Anu Repo

# Renkaiden hyödyntäminen tierakenteissa

Esiselvitys

Anu Repo

# RENKAIDEN HYÖDYNTÄMINEN TIERAKENTEISSA

ESISELVITYS



Säkkiväline Puhtaanapito Oy
Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri

Helsinki 19.9.1997

2. painos

# TIIVISTELMÄ

Tämä esiselvitysraportti on tehty Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n toimeksiantamana. Esiselvitys liittyy Säkkivälineen ja Tielaitoksen yhteistyöprojektiin, jonka tavoitteena on tutkia käytöstä poistettujen autonrenkaiden soveltuvuutta tie-ja katurakentamiseen sekä edistää autonrenkaista valmistettavien tuotteiden käyttöä valtakunnallisesti. Tässä työssä on erityisesti pyritty kirjallisuuden perusteella selvittämään kokonaisten renkaiden ja renkaista valmistettavan rengasrouheen (RR2) teknisiä ominaisuuksia sekä esittelemään näiden rengastuotteiden käyttökohteita maarakentamisen osalta. Raportin pääpaino oli rengasrouheen käytön tierakenteissa kevennysmateriaalina kuvauksessa.

Tämän selvityksen eräänä tärkeänä tavoitteena oli tutkia rengasrouheen ympäristöön mahdollisesti aiheuttamia vaikutuksia (pohjavesi, maaperä), jotta materiaali voitaisiin tuotteistaa ja saada yleisesti käyttöön maarakennusmateriaalina. Näiden em. osa-aluiden lisäksi työssä on esitelty kaksi rengasrouheella toteutettua koekohdetta Yhdysvalloissa, joista on saatu tietoa rengasrouheen rakentamisen tekniikasta ja tehtyjen rakenteiden käyttäytymisestä sekä mahdollisten olosuhdetekijöiden vaikutuksesta.

Rengasrouheelle suoritettujen laboratoriokokeiden sekä koerakenteista mitattujen havaintojen perusteella materiaalin on todettu soveltuvan hyvin tierakenteiden kevennys- ja routasuojausmateriaaliksi. Tierakentamisen lisäksi rengasrouhe soveltuu hyvin myös erilaisten tukiseinien ja -muurien taustatäyttömateriaaliksi sekä kaatopaikoille käytettäväksi kuivatus- ja peiterakenteissa. Kokonaisia renkaita on myös hyödynnetty positiivisin kokemuksin luiskien suojaus- ja vahvistusrakenteissa sekä meluvalleissa. Tutkimusta tarvitaan kuitenkin lisää rengasrouheen mekaanisista ominaisuuksista sekä päällysrakenteen mitoituksesta (kantavuus) käytettäessä materiaalia kevennysrakenteissa.

Yhdysvalloissa rengasrouheelle suoritettujen ympäristökelpoisuustestien perusteella materiaalin ei ole todettu olevan haitallista jätettä, vaikka materiaalista liukoisuustestien perusteella liukenee joitakin eri metalleja ja orgaanisia yhdisteitä. Näiden ympäristöarviointien lisäksi on Suomessa rengasrouhetta kuitenkin tutkittava lisää sekä laboratoriossa että koerakenteessa, jotta materiaali voidaan hyväksyä maarakentamisessa yleisesti käytettäväksi tuotteeksi. Tällaisia testejä on jo osittain aloitettukin.

ABSTRACT

This clearing report has been made by order of Säkkiväline Puhtaanapito Oy. The report is part of the co-operation project between Säkkiväline and Finnish National Road Administration. One purpose of the team-work project has been to examine if old tires are suitable for road and street construction. Furthermore there is an intention to make progress in using tire products widely over the country. This work consists technical properties of both whole tires and shredded tires. Many purposes of using tire materials are also described. Knowledge of this clearing report is gathered with help of several literature articles most of them from United States. The main point of the report was to describe the use of shredded tires as a lightweight material in road structure.

One important purpose of this literature clearing was to get information of tire materials environmental impacts (ground water, soils). This is because there is an aim to get tire material as a general product for road construction. Thus there would be no need to ask permission for every construction project separately. In addition this report consists presentation of two test roads in United States constructed by shredded tires. Building technics and behaviour of tire structures are the main data of these test subjects.

Based on laboratory tests and test embankment observations it is reasonable to use shredded tires as a lightweight material as well in structures preventing frost penetration through the road structure. Furthermore scrap tires has been used successfully with different kind of support walls as a fill material and also like covering and draining material in landfill structures. Whole tires has benefit in noise barriers as well as in various slides operating like a reinforcement or an erosion protection. However there is a need of more investigations concerning mechanical properties of shredded tires and design methods for determing super structures thickness especially with lightweight structures (bearing capacity).

In United States there has been carried out several environmental leachate analysis for scrap tires. Based on these tests tire chips has not been found to be harmful waste though tests indicate some leaching substances (metals, organic combounds) from tire material. However in Finland shredded tires must be tested in laboratory and in test embankments before it could be accepted as a general building material in different kind of soil and road structures. Partially such clearing studies have already been started in Finland.

# ALKUSANAT

Tämä esiselvitystyö on tehty Säkkiväline Oy:n toimeksiantamana. Esiselvitysprojektin ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Mikko Talola Säkkiväline Oy:sta. Projektin ohjausryhmään kuuluivat lisäksi Timo Valkonen Säkkiväline Oy:sta, Ari Kettunen Helsingin Kaupungin Rakennusvirastosta, Matti Lojander Teknillisestä korkeakoulusta, Matti Kolhinen Tielaitoksen Geopalveluista sekä Mikko Smura Uudenmaan tiepiiristä. Esiselvitysprojektin aikana tein lisäksi yhteistyötä Veli-Matti Uotisen kanssa rengasrouhekoerakenteen suunnitelmaa varten Uudenmaan tiepiirissä.

Esitän kaikille esiselvitysprojektissa mukana olleille lämpimät kiitokset arvokkaista neuvoista ja kannustavasta työn ohjauksesta.

Helsingissä syyskuun 19. päivänä 1997

Anu Repo

RENKAIDEN HYÖDYNTÄMINEN TIERAKENTEISSA
Esiselvitys

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

# 1. JOHDANTO

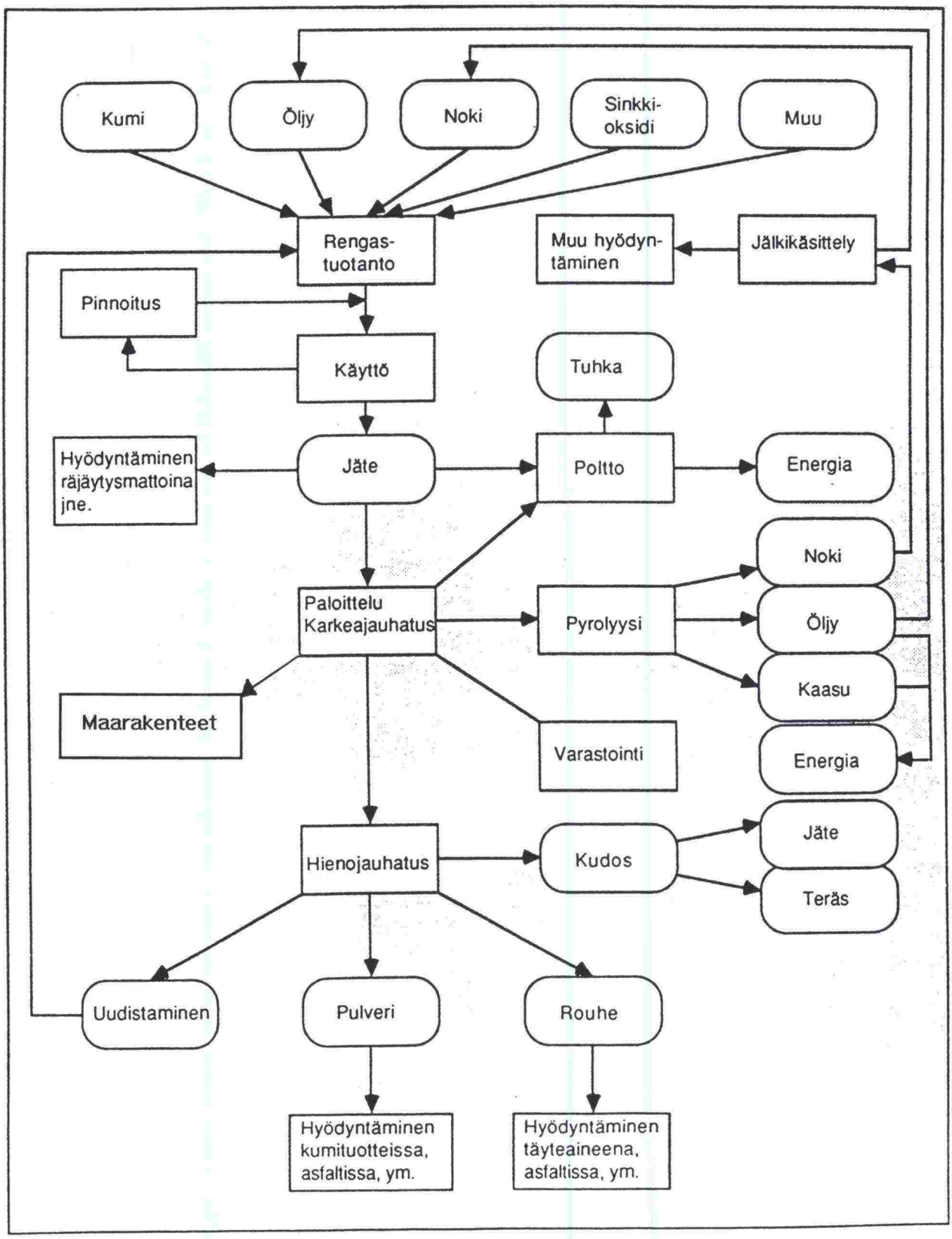
Tämä esiselvitys on kirjallisuustutkimus ja se on osa Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n ja Tielaitoksen yhteistyöprojektia, jonka tavoittena on tutkia renkaiden soveltuvuutta tie- ja katurakentamiseen ja edistää autonrenkaista valmistettavien tuotteiden käyttöä valtakunnallisesti. Tämän esiselvitysraportin pääasiallisena tarkoituksena on selvittää kirjallisuuden avulla kokonaisten renkaiden ja renkaista valmistettavan rengasrouheen teknisiä ominaisuuksia ja esitellä tierakentamisen lisäksi muita mahdollisia käyttökohteita. Kuvassa 1.1 on esitetty yleinen kaaviokuva renkaiden hyödyntämismahdollisuuksista, joista kumipulverin valmistus sekä pyrolyysi ovat vain teoreettisia mahdollisuuksia hyödyntää renkaita Suomessa. Kuvaa on hieman mukailtu eli siihen on lisätty 'maarakenteet' -laatikko.

Suomessa käytöstä poistuu vuosittain noin 2-2,5 miljoonaa autonrengasta, joka vastaa painona noin 25 000 tonnia ja tilavuutena noin 200 000 $m^3$ renkaita. Vuodessa poistuva kokonaisten renkaiden määrä on rengasrouheeksi muutettuna noin 50 000 irto-$m^3$ (tiivistämätön rouhe). Tähän mennessä suurin osa käytöstä poistetuista renkaista on päätynyt kaatopaikoille, joissa ne ovat muun jätteen kanssa aiheuttaneet mm. tiivistysvaikeuksia ja huomattavaa palovaaraa. Valtioneuvoston 1.6.1996 tekemän päätöksen ansiosta tästä lähtien kaikki jäterenkaat tulee kerätä hyötykäyttöä varten eikä niitä saa enää sijoittaa kaatopaikalle. Suomen Rengaskierrätys Oy ja Säkkiväline Puhtaanapito Oy ovatkin tehneet yhteistyösopimuksen, jonka mukaan Säkkiväline huolehtii renkaiden keräämisestä ja käsittelystä ja toimittamisesta hyötykäyttöön. Raportissa esitellään renkaiden kierrätystoimintaa sekä renkaista valmistettavia tuotteita.

Autonrenkaista valmistettavan rengasrouheen pääasiallisia ominaisuuksia ovat kestävyys, lujuus, sitkeys, keveys ja lisäksi sen hinta rakennusmateriaalina on edullinen. Rengasrouhe sietää hyvin sään vaihteluita ja se ei ime vettä ympäristöstään juuri lainkaan. Teknisten ominaisuuksien ansiosta sitä voidaan tierakentamisessa hyödyntää kevennysmateriaalina huonosti kantavilla pehmeiköillä, pengertäytteenä sekä routaeristeenä pienen lämmönjohtavuutensa ansiosta. Tässä selvityksessä esitellään rengasrouheen hyödyntämistä myös muihin kuin tierakenteisiin kuten esimerkiksi käyttöä kaatopaikkojen kuivatuskerroksiin, tukimuurien kevyisiin taustatäyttöihin ja maaluiskien tukirakenteeksi. Esiselvityksen pääpaino on kuitenkin rengasrouheen kevennyssovellutuksen esittämisessä. Raportissa esitellään lisäksi kaksi Yhdysvalloissa rengasrouheesta tehtyä koerakennetta ja rakennekokeiden tuloksia.

Autonrenkaiden laajamittainen hyötykäyttö tienrakennuskohteissa edellyttää ympäristöluvan hakemista ympäristölupamenettelylain mukaisessa järjestyksessä. Vaihtoehtona on pyrkiä saamaan rengasrouhe rakennusmateriaalituotteeksi. Tämän selvityksen yksi tavoite on edistää autonrenkaista saatavien materiaalien tuotteistamista, jonka jälkeen ei tarvitse hakea lupaa jokaiselle tiehankkeelle erikseen. Tuotteen ympäristöön aiheuttamat vaikutukset on selvitettävä ennen kuin rengasrouhe voidaan hyväksyä rakennusmateriaaliksi. Tässä työssä esitellään Suomen ympäristöviranomaisten materiaalista vaatimat selvitykset sekä laboratoriokokeet ja rakennekokeet, jotta rengasrouhetta voitaisiin hyödyntää laajalti tulevaisuudessa. Lisäksi kerrotaan ympäristövaikutuksista, joita on tutkittu Yhdysvalloissa toteutetuissa koekohteissa.

Rengasrouhe on teknis-taloudellinen tuote eli teknisten etujensa lisäksi materiaalilla on edullinen hinta verrattuna tavanomaisissa kevennys- ja routarakenteissa käytettyihin rakennusmateriaaleihin. Luvussa 6 on esitetty kustannuslaskelma rengasrouheella toteutettavasta kevennyskoekohteesta, joka on suunniteltu rakennettavan Ilola-Sannäsiin (Pt 11863) kesän -97 aikana. Kustannuslaskelmassa on esitetty myös vertailu kevytsora-materiaaliin.




Kuva 1.1. *Romurenkaiden hyödyntämismahdollisuuksia / Ajoneuvoromu-työryhmän osamietintö 1989/*

# 2. RENGASTUOTANTO

## 2.1. Renkaiden kierrätys

Käytöstä poistuneet autonrenkaat ovat jätettä, jonka hävittäminen on ongelmallista maailmanlaajuisesti. Käytettyjen renkaiden sijoittaminen on vaikeinta Yhdysvalloissa, jossa vuosittain poistuu käytöstä yli 200 miljoonaa jäterengasta. Suomessa käytettyjen renkaiden poistuma on noin 100 kertaa pienempi kuin Yhdysvalloissa eli noin 2-2,5 miljoonaa rengasta vuositasolla. Autonrenkaat ovat huonosti kokoonpuristuvia ja suuren palovaaran takia ne eivät sovi kaatopaikoille. Renkaiden leikkaaminen pieniksi paloiksi on helpottanut renkaiden käsittelyä ja Yhdysvalloissa onkin käytetty menetelmää kaatopaikkasijoittamisen helpottamiseksi.

Suomessa valtioneuvoston 1.6.1996 tekemän päätöksen jälkeen ei jäterenkaita saa enää sijoittaa kaatopaikoille vaan niille on löydettävä hyötykäyttöä. Kyseessä on ensimmäinen jätelain nojalla toimeenpantu tuottajan vastuuseen perustuva jätteiden käsittelyä ja hyödyntämistä koskeva järjestelmä. Päätöksen mukaisesti renkaan kuluttajan on luovutettava käytöstä poistettu rengas myyjälle tai renkaan tuottajan järjestämään vastaanottopisteeseen. Rengas- tai autoliikkeen, huoltoaseman, rengaskorjaamon tai -pinnoittajan on otettava renkaat korvauksetta vastaan. Päätöksen mukaan renkaat tulee ensisijaisesti uudelleen käyttää eli pinnoittaa tai muuten hyödyntää materiaalina. Vasta toissijainen keino on renkaiden energiasisällön hyödyntäminen esimerkiksi polttamalla.

Suomen Rengaskierrätys Oy on järjestäytyneen rengasalan perustama yhtiö, joka vastaa jäterenkaiden kierrätystoiminnasta. Suomen Rengaskierrätys Oy on tehnyt sopimuksen Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n kanssa, jonka perusteella yhtiöt ovat perustaneet valtakunnallisen keräysverkoston (kuva 2.1). Sen muodostavat ympäri Suomea jakautuneet runsas 70 keräyspistettä, joista renkaat kuljetetaan 6 eri alueterminaaliin. Ne sijaitsevat Vantaalla, Turussa, Lahdessa, Tampereella, Lappeenrannassa ja Oulussa. Terminaaleista renkaat lähtevät eteenpäin kierrätykseen ja hyötykäyttöön. Kierrätystoiminta rahoitetaan uusien renkaiden hankinnan yhteydessä kuluttajalta perittävällä kierrätysmaksulla. Renkaiden kierrätyksen tavoitteena on saada valtioneuvoston päätöksen mukaisesti hyötykäyttöön noin 90 % käytöstä poistuneista renkaista vuoteen 2000 mennessä. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus valvovat järjestelmän toimivuutta. Taulukossa 2.1. esitetty vuosina 1984-1987 Suomessa kertyneet jäterenkaat painona. Vuoden 1987 kertymä on lähellä tämän hetkistä tilannetta Suomessa.

Taulukko 2.1. *Suomen jäterenkaiden kertymä v. 84-87, (yksikkö: tonnia/v) /Ajoneuvoromutyöryhmän osamietintö 1989/.*

| | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 |
|---|---|---|---|---|
| Henkilö- ja pakettiautot | 12 300 | 11 600 | 12 000 | 14 300 |
| Kuorma- ja linja-autot | 8 800 | 9 100 | 8 900 | 9 400 |
| Muut renkaat | 4 600 | 4 800 | 4 700 | 4 900 |
| Yhteensä | 25 700 | 25 500 | 25 600 | 28 600 |




Kuva 2.1. *Alueelliset kierrätysterminaalit Suomessa (tilanne 31.3.1997).*

## 2.2. Rengastuotteet

### 2.2.1. Kokonaiset renkaat

Autonrenkaiden materiaali- ja energia-arvo on suuri. Renkaasta noin 50 % on kumia ja yli 20 % nokea (taulukko 2.2). Palavien aineiden osuus renkaassa on lähes 90 % ja tehollinen lämpöarvo on n. 31 MJ/kg. Renkaan rikkipitoisuus on samaa suuruusluokkaa kuin polttoöljyssä.
Autonrengas koostuu seuraavista osista:
- kulutuspinta (erilaisia kumilaatuja)
- vyönalusvahvike (vyöpaketti usein 'teräskankaasta')
- vannenauha (kaapelilanka)
- runkovahvike (nylon, raijon, polyesteri)

Yhdysvalloissa käytetään myös sellaisia renkaita, joissa runkovahvikkeeseen on käytetty lasikuidulla vahvistettuja kankaita. Myöskin lasikuidun ja teräksen yhdistelmää on käytetty sidontamenetelmänä. Tällaisia runkovahvikemateriaaleja ei kuitenkaan sovelleta Suomesta ostettavissa autonrenkaissa.

Autonrenkaiden valmistusprosessin voidaan katsoa muodostuvan eri aineosista seuraavasti:
- 100 osaa erilaisia kumimateriaaleja
- 60 osaa teknistä nokea
- 10-30 osaa öljyjä (massan muokattavuus paranee)
- 3 osaa suoja-aineita (vulkanoitumisen tehostamiseksi)
- 5-7 osaa aktivaattoreita ($SiO_2$, stearinihappo)
- 2-3 osaa kiihdyttimiä (reaktiot tehostuvat)
- 1-2 osaa hartseja (osa-aineiden tarttuvuus toisiinsa, kovettaminen)

Taulukossa 2.2 on esitetty henkilöauton renkaan keskimääräinen koostumus painoprosenteissa.

Taulukko 2.2. *Uuden henkilöauton renkaan keskimääräinen koostumus /Ajoneuvoromutyöryhmän osamietintö 1989/.*

| Aine | Osuus/p-% |
|---|---|
| Polymeeri (kumi) | 50,8 |
| Sinkkioksidi | 2,1 |
| Rikki | 1,2 |
| Mineraalitäytteet | 2,5 |
| Pehmittimet ja suoja-aineet | 10,2 |
| Teräs | 6,6 |
| Tekstiili | 3,6 |
| Noki | 23,0 |

Ajoneuvoissa käytettävien uusien renkaiden keskipainot vaihtelevat ajoneuvoittain taulukossa 2.3 esitetyllä tavalla. Henkilö- ja pakettiauton käytetyn renkaan keskipaino on noin 5,5-6 kg sekä kuorma- ja linja-auton käytetyn renkaan 45-50 kg eli painon vähentyminen on noin 15-25 %.

Taulukko 2.3. *Uuden renkaan keskipaino ajoneuvoittain /Ajoneuvoromutyöryhmän osamietintö 1989/.*

| Ajoneuvo | Renkaan paino kg |
|---|---|
| Henkilöauto | 7,5 |
| Pakettiauto | 11,0 |
| Kuorma- ja linja-auto | 59,0 |
| Traktori (etupyörä) | 14,5 |
| Traktori (takapyörä) | 80,0 |

Suomessa pinnoitetaan käytetyistä henkilöauton renkaista arviolta 10-20% ja kuorma-auton renkaista lähes kaikki. Kuorma-auton rengas voidaan pinnoittaa 2-4 kertaa, mutta henkilöauton vain kerran. Pinnoittamisen lisäksi kokonaisia renkaita on hyödynnetty myös laiturien ja alusten suojauksina, turvaesteinä ajoradoilla, räjäytysmattoina, kalastusriuttoina jne. , mutta jätehuollon kannalta Suomessa näiden käyttökohteiden merkitys on ollut vähäinen.

Maarakentamisessa on mahdollista hyödyntää kokonaisia renkaita tukiseinien ja -muurien taustatäyttöihin, luiskien eroosiosuojaksi ja kevyeksi täytteeksi meluvalleihin. Näitä käyttökohteita esitellään tarkemmin luvussa 4. Arvio kokonaisten renkaiden tilavuuspainosta on noin $\gamma = 1{,}3$ kN/m$^3$. Rakenteiden mitoitukseen suositellaan käytettäväksi tilavuuspainon arvoa $\gamma = 2$ kN/m$^3$.

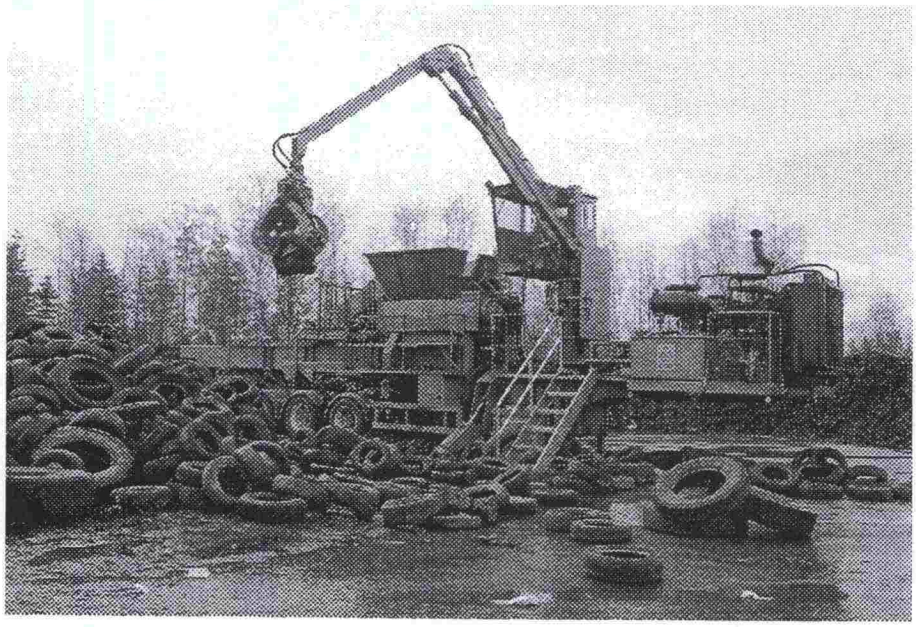
2.2.2. Suomessa renkaista valmistettavat tuotteet

Renkaiden hyötykäyttö tierakenteissa edellyttää yleensä niiden leikkaamista paloiksi. Renkaiden paloittelu suoritetaan alueterminaaleissa, joihin renkaat kuljetetaan keräyspisteistä ja varastoidaan. Paloittelu suoritetaan liikuteltavalla kanadalaisvalmisteisella rengasleikkurilla, joita Suomessa tällä hetkellä on kaksi konetta (ST 150 ja ST 800, kuva 2.2). Tavanomaisin laitteella suoritettava paloittelu tuottaa rengasrouhetta (kuva 2.3), jonka nimellismitat ovat 5 x 5 cm 2 (RR2). Toisella laitteella (ST 800) voidaan valmistaa myös ns. "roisketta", joka on pitkää ja kapeaa rouhetta ja koko on selvästi isompi kuin rengasrouheella eli noin 10 x 30 cm$^2$ (RR1). Taulukossa 2.4 on esitetty rengastuotteiden epävirallinen luokittelu.

Valmistettaviin tuotteisiin voidaan vaikuttaa valitsemalla prosessoitavat rengastyypit. Yleensä henkilö- ja kuorma-autojen renkaat ovat keräys- ja varastointivaiheessa sekaisin. Isommat ja painavammat työkonerenkaat pidetään varastossa yleensä erillään.

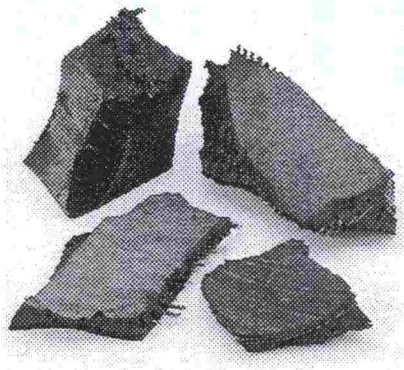
Taulukko 2.4. *Rengastuotteiden epävirallinen luokittelu.*

| Rengastuotteen koodi | Rengastuotteen nimi |
|---|---|
| RR0 | Kokonaiset renkaat |
| RR1 | Suurikokoinen rengasrouhe (10 x 30 cm$^2$) |
| RR2 | Rengasrouhe ( 5 x 5 cm$^2$) |

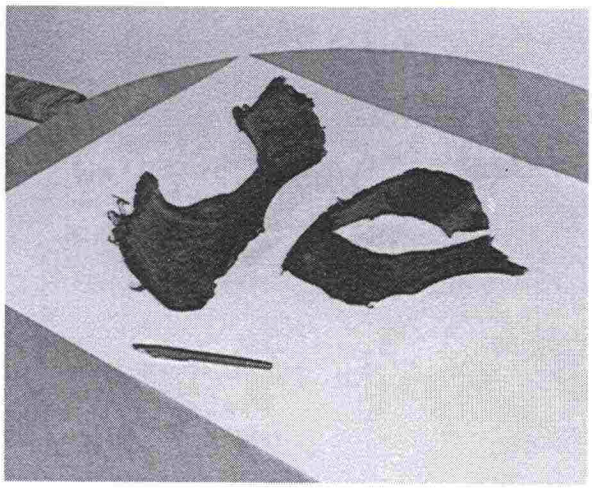


Kuva 2.2. *Suomessa käytössä oleva kanadalaisvalmisteinen rengasleikkuri ST 800*.

a)



b)



Kuva 2.3. *Autonrenkaista valmistettava a) rengasrouhe (5 x 5 cm$^2$, RR2) ja b) suurikokoinen rengasrouhe eli 'roiske' (10x30 cm$^2$, RR1) /Säkkiväline/.*

Auton renkaista valmistettavaa rengasrouhetta on hyödynnetty kevennys- ja routasuojamateriaalina tierakenteissa ja käyttökokemukset ovat olleet lupaavia. Näistä käyttökohteista on tarkemmin kerrottu luvussa 4. Suurikokoista rengasrouhetta (RR1) on kirjallisuuden perusteella käytetty koeluonteisesti kevyenä pengertäytemateriaalina. Käyttö ei ole kuitenkaan ollut niin laajaa kuin pienikokoisemman rengasrouheen (RR2).

Eräissä Euroopan maissa autonrenkaista jauhetaan erittäin hienoa kumipulveria, jota voidaan käyttää esimerkiksi asfaltin lisäaineena. Kumipulverin osuus sideaineesta on vaihdellut välillä 5-25 %. Kumin on todettu parantavan tiepäällysteen kulutuksen kestävyyttä, vähentävän tienpinnan muodonmuutoksia ja liikennemelua. Lisäksi 'kumiasfaltin' on huomattu lisäävän tien liikenneturvallisuutta ja vähentävän tienpinnan kunnossapitoa etenkin talvella. Käytön yleistymistä asfaltissa rajoittaa rakenteen korkea hinta. Tien päällystyskustannukset ovat 50-60 % korkeammat kuin käytettäessä tavanomaista päällystettä. Kumipulverin käyttöä asfaltissa on käsitelty esimerkiksi seuraavissa kirjallisuuslähteissä: /Sjöblom 1992/, /Bloomquist 1993/ ja /Epps et al 1994/.

Kumipulverin valmistus edellyttää hienojauhatuslaitteistoa sekä terästen ja kudosten poistoa renkaista. Tällaista laitteistoa ei ole Suomessa eikä investoinnin suuruuden takia sellaisen rakentaminen näytä todennäköiseltä. Muita käyttökohteita kumipulverille on urheilukenttien rakennusaineena, lisäaineena betonissa kylmäkestävyyden parantamiseksi sekä pinnoite- ja tiivistemateriaalina.

# 3. MATERIAALIOMINAISUUDET

## 3.1. Luokitusominaisuudet

### 3.1.1. Tiheys

Kokonaiset autonrenkaat ja renkaista valmistettava rengasrouhe on keveytensä ansiosta erittäin käyttökelpoinen tuote tie- ja katurakentamiseen. Rengastuotteet sopivat käytettäväksi kevennysratkaisuihin heikosti kantavilla rakennuspohjilla sekä kevyinä täytemateriaaleina esimerkiksi meluvalleissa sekä tukimuurien ja -seinien taustatäytöissä. Kirjallisuuden perusteella tiheys vaihtelee karkeasti välillä 200-800 kg/m$^3$. Tiheyden arvoon vaikuttaa merkittävästi rengasrouheen rakeisuus ja materiaalille rakentamisen yhteydessä suoritettava tiivistys ja yllä olevan maakerroksen paino liikennekuormineen.

Tässä tapauksessa irtotiheydellä tarkoitetaan materiaalin massan (kiinteä aines + ilma + vesi) ja kokonaistilavuuden suhdetta (kaava 1). Se voidaan määrittää laboratoriossa tai koerakenteesta mittojen ja materiaalin painon perusteella.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (1)$$

| | |
|---|---|
| $\rho$ | on materiaalin irtotiheys (kg/m$^3$) |
| m | materiaalin massa (kg) |
| V | materiaalin tilavuus (m$^3$) |

Taulukossa 3.1. on esitetty kirjallisuudessa esiintyviä irtotiheyden arvoja. Taulukkoon on lisätty myös tiheyttä vastaava tilavuuspainon arvo.

### 3.1.2. Tilavuuspaino

Materiaalin tilavuuspaino voidaan laskea kaavalla (2), joka tarkoittaa maan painon ja kokonaistilavuuden suhdetta. Tilavuuspaino määritetään irtotiheyden avulla ja se saadaan kertomalla tiheysarvo maan vetovoiman kiihtyvyydellä. Tilavuuspaino voidaan määrittää kuivana sekä märkänä. Rengasmateriaali ei ime vettä juuri lainkaan.

$$\gamma = \frac{mg}{V} \qquad (2)$$

| | |
|---|---|
| $\gamma$ | on tilavuuspaino (kN/m$^3$) |
| m | materiaalin massa (kg) |
| g | maan vetovoiman kiihtyvyys ($\approx$ 9,81 m/s$^2$) |
| V | materiaalin tilavuus (m$^3$) |

Maastohavaintojen (kerrospaksuus ja painuma) perusteella tilavuuspaino voidaan myös määrittää kaavalla (3), joka laskee keskimääräisen tiivistetyn materiaalin tilavuuspainon.

$$\gamma_t = \gamma_{to} \frac{H_o}{H_o - \Delta H} \qquad (3)$$

| | |
|---|---|
| $\gamma_t$ | on keskimääräinen tiivistetty tilavuuspaino (kN/m$^3$) |
| $\gamma_{to}$ | keskimääräinen löyhä tilavuuspaino (kN/m$^3$) |
| $H_o$ | rengasrouherakenteen keskimääräinen paksuus (m) |
| $\Delta H$ | rengasrouherakenteen keskimääräinen painuma (m) |

Rengasrouheen tilavuuspaino kirjallisuuden perusteella vaihtelee suuresti /Humphrey 1996 / ja on noin välillä 3-8 kN/m$^3$. Laboratoriossa määritettävän tilavuuspainon arvoon vaikuttavia tekijöitä ovat kuormitus ja tiivistys, rengasrouheen raekoko ja - muoto sekä valittu testilaitteisto. Koerakenteesta tai maastossa tierakenteesta suoraan määritettävän tilavuuspainon arvoon vaikuttaa kuormituksen ja raekoon lisäksi työtekniset ratkaisut ja tiepenkereen rakenne (poikkileikkaus).

Laboratoriossa on saatu hieman pienempiä tilavuuspainon arvoja kuin maastotestien yhteydessä. Testilaitteistoa ei ole kehitetty vielä tarpeeksi, rengasrouhekokeet laboratoriossa tehdään tavallisesti liian pienillä muoteilla. Laboratoriossa määritetyt tiheysarvot vaihtelevat karkeasti välillä 340-500 kg/m$^3$ löyhälle ja välillä 610-690 kg/m$^3$ tiivistetylle materiaalille. Maastossa koekohteista määritetyt tiheydet ovat karkeasti vaihdelleet välillä 670-830 kg/m$^3$ /Humphrey 1996/ Maastohavaintojen perusteella laskettuun tilavuuspainon arvoon voidaan liittää pieni epävarmuustekijä rakenteen todellisen tiivistymisen ja painumisen osalta. Arvioitaessa rakenteessa toteutuvaa tilavuuspainoa täytyy huomioida rengasrouhekerroksen kokoonpuristuminen omasta painostaan sekä päällysrakenteen painosta.

Taulukkoon 3.1 on koottu yhteenvetona kirjallisuudessa esiintyvien laboratoriossa tai maastotutkimusten perusteella määritettyjen irtotiheyksien ja tilavuuspainojen arvoja sekä niihin vaikuttavia tekijöitä. Taulukosta 3.1 voidaan todeta kuormituksen ja tiivistyksen vaikutus tiheys- ja tilavuuspainoarvoihin. Laboratoriossa määritettyjen tilavuuspainojen voidaan todeta olevan pienempiä kuin vastaavat koekohteiden arvot. Tiivistystavalla ei tutkimusten mukaan ole suurta vaikutusta. Erään tutkimuksen mukaan mukaan tärytiivistyksestä ei ole mainittavaa hyötyä rengasrouheen rakentamisessa, mutta tiivistystapa soveltuu hyvin rengasrouhe-hiekka -rakenteelle /Ahmed and Lovell 1993/. Tutkimusten mukaan Proctor-tiivistys ei ole myöskään soveltuva menetelmä rengasrouheelle. Rengasrouheen kunnollinen tiivistäminen vaatii rengasrouhekerroksen päälle pysyvän kuorman esim. karkearakeisen maatäytteen rakentamista.

*Taulukko 3.1. Rengasrouheen luokitusominaisuudet. Irtotiheys ja tilavuuspaino. Yhteenveto kirjallisuudessa esiintyvistä arvoja*

| IRTOTIHEYS/TILAVUUSPAINO | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Irtotiheys (kg/m3) | Tilavuus-paino (kN/m3) | Kuormitus/ Tiivistys | Mittauslaite/ Määritystapa | Kumirouhekoko [d] = [mm] | Olosuhteet (koerakenne, laboratorio) | Kirjallisuuslähde |
| 390-485<br>535<br>730<br>845<br>860 | 3,8-4,8<br>5,2<br>7,2<br>8,3<br>8,4 | löyhä tiivistys<br>löyhä tiivistys<br>tiivistys 3 krt<br>maatäyte + AB<br>1 v painuma | laskenta<br>painon ja<br>kokoonpuristuv.<br>perusteella | keskimääräinen<br>koko 50 mm | koerakenne<br>(maanvieremän korjaus) | Upton and Machan 1993 |
| 618<br>642<br>619 | 6,1<br>6,3<br>6,1 | 60%<br>Proctor-energiasta<br>(tiivistys) | AASHTO T-180 -86<br>(standardikoe) | 13-76 mm | laboratoriossa | Humphrey et al. 1993 |
| 230-350<br>500-565<br>500 | 2,3-3,4<br>4,9-5,5<br>4,9 | - | laskenta<br>tiivistyskoe<br>tiivistyskoe | 300 mm ('roiske')<br>20-46 mm<br>30 mm | koerakenne (maasto)<br>laboratorio<br>laboratorio | Newcomb and Drecher 1994 |
| 469<br>608<br>470<br>610 | 4,6<br>6<br>4,6<br>6 | löyhä<br>tiivistetty<br>löyhä<br>tiivistetty | vedenläpäisevyys-<br>kokeen<br>yhteydessä<br>määritetty | 25-64 mm<br>- "-<br>5-51 mm<br>- "- | laboratoriossa | Humphrey 1996 |
| 644<br>833<br>601<br>803<br>622<br>808 | 6,3<br>8,2<br>5,9<br>7,9<br>6,1<br>7,9 | tiivistetty<br>tiivistetty<br>tiivistetty | vedenläpäisevyys-<br>kokeen<br>yhteydessä<br>laskettu | 5-51 mm<br>- "-<br>20-76 mm<br>- "-<br>10-38 mm<br>- "- | laboratoriossa | Humphrey et al. 1992 1993 |
| 653 | 6,4 | - | - | 10-38 mm | laboratorio | Ahmed 1993 |
| 562<br>598 | 5,5<br>5,8 | Modified proctor<br>" | -<br>- | 1-10 mm<br>" | -<br>- | Cecich et al 1996 |
| 410-437<br>503-565<br>232 | 4-4,3<br>4,9-5,5<br>2,3 | tiivistetty<br>tiivistetty<br>löyhä | -<br>-<br>- | keskim. 50 mm | laboratorio | Drescher and Newcomb 1994 |

Taulukossa 3.1. ei ole tiheysarvoja suurikokoiselle rengasrouheelle (> 300 x 100 $mm^2$), jonka tilavuuspainoksi voidaan arvioida noin 3-4 kN/m3. Tällaista rengasrouhetta voidaan hyödyntää keveytensä ansiosta täytteenä meluvalleissa ja taustatäyttönä tukimuureissa ja -seinissä. Tierakenteen alle materiaali ei sovellu heikon tiivistymisen johdosta. Kokonaisia autonrenkaita voidaan soveltaa samoihin käyttökohteisiin kuin suurikokoista rengasrouhetta.

Tielaitoksen Geokeskuksen laboratoriossa on keväällä -97 tehty tutkimus rengasrouheen (RR2) irto- ja kiintotiheyksien sekä rakeisuuden ja kappaleiden muodon määrittämiseksi. Tutkimuksen selostus ja tulokset ovat esitetty liitteessä 1.

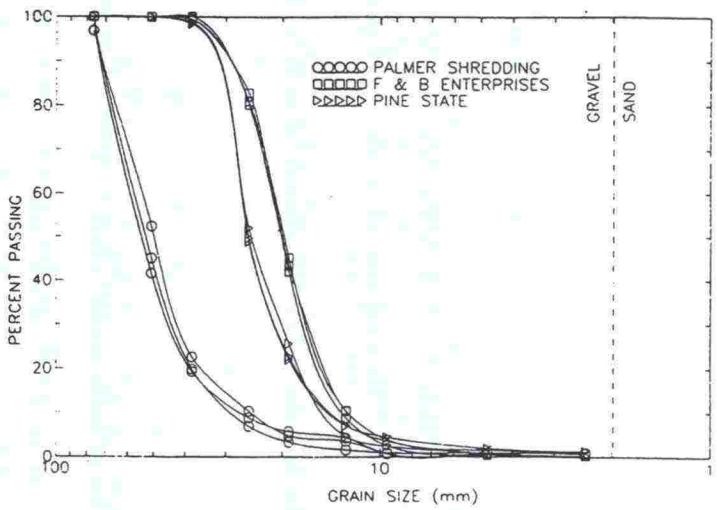
### 3.1.3. Rakeisuus

Rakeisuus on yksi maarakenteissa käytettävän materiaalin luokitusominaisuuksista, joka määritetään yleensä rakenteen suunnittelua varten. Rengasrouheen raekoolla on vaikutus materiaalin tiheyteen. Tivistämättömän pienirakeisen rouhemateriaalin tiheys on suurempi kuin suurikokoisemman tiivistämättömän rouheen. Rakeisuus voidaan määrittää standardikokeen AASHTO T27-87 mukaisesti /Humhrey et al 1992/ .

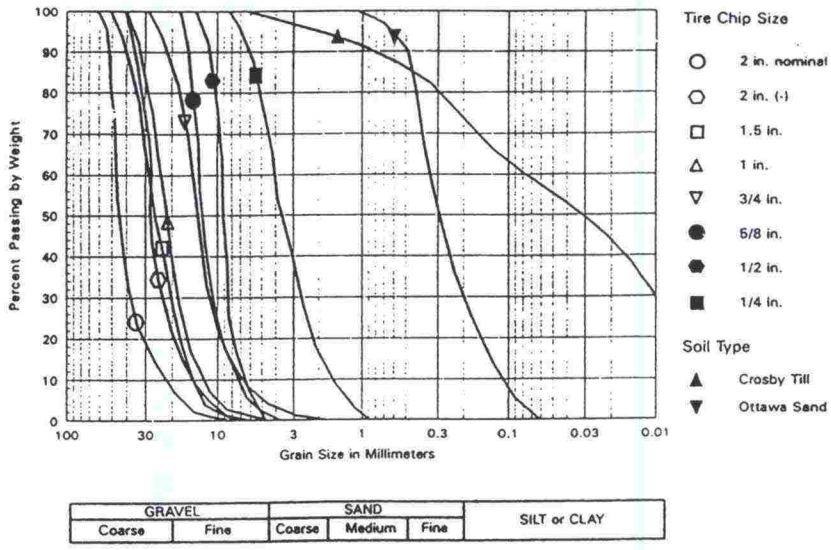
Kuvissa 3.1 ja 3.2 on esitetty kahdesta eri kirjallisuusviitteestä poimittujen rengasrouheiden rakeisuuskäyrät. Kuvassa 3.1 on käyrä kolmesta erilaisesta rengasrouhemateriaalista /Humphrey et al/. Materiaalit ovat 3 eri tuottajalta. Karkein materiaali on nimeltään Palmer shredding -rouhe, hienojakoisin materiaali on F&B Enterprises -rouhe ja kolmas materiaali on Pine State -rengasrouhe. Kuvaajien perusteella rengasrouheiden raekoot ovat karkeasti välillä 2-80 mm. Rakeisuuden lisäksi materiaalit eroavat toisistaan myös sidontatavan perusteella:

. Palmer shredding -> teräksillä sidottu rakenne (max d = 76 mm)
. F&B Enterprises -> lasikuidulla vahvistetulla kankaalla sidottu rakenne (max d = 38 mm)
. Pine State -> lasikuidulla ja teräksillä sidottu (max d = 51 mm)

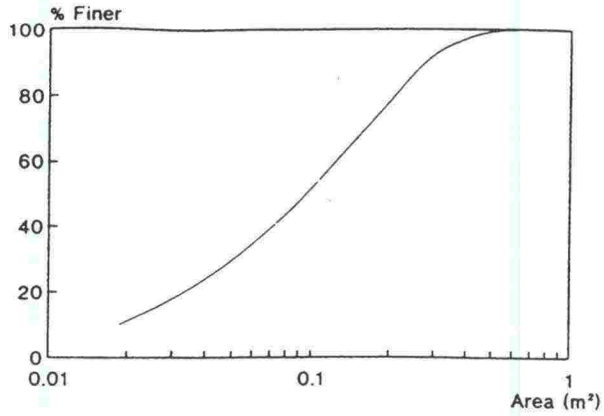
Suomessa ei käytetä renkaiden runkovahvikkeessa lasikuitua. Kuvassa 3.2 on 7 eri rengasrouheen lisäksi esitetty 2 käyrää, jotka kuvaavat hiekan (Ottawa sand) ja moreenin (Crosby till) rakeisuutta. Kuvassa 3.3 on lisäksi esitetty suurikokoisen rouheen rakeisuutta kuvaava käyrä, jossa muuttujana on pinta-ala. Kuormituksella ei ole vaikutusta rakeisuustestin tuloksiin / Cecich et al / mukaan. Rengasrouhepalan muodolla on myös merkitystä sen tiivistymisominaisuuksiin sekä rakennekerroksen homogeenisuuteen eli mitä pienempi raekoko sitä tiiviimpi ja homogeenisempi rengasrouherakenne.




Kuva 3.1. *Rakeisuuskäyrä 3 eri rengasrouhemateriaalille /Humphrey et al 1993/.*




Kuva 3.2. *Rakeisuuskäyrä 7 eri rengasrouheelle ja 2 maalajille /Ahmed and Lovell 1993 /.*




Kuva 3.3. *Rakeisuuskäyrä suurikokoiselle rengasrouheelle /Newcomb and Drescher 1994/.*

### 3.1.4. Huokoisuus

Rengasrouhemateriaali koostuu 3 eri komponentista: kiinteästä materiaaliaineksesta ja huokostilan täyttävästä huokosilmasta ja -vedestä. Veden osuus on erittäin pieni. Rengasrouhe absorboi vettä itseensä tutkimusten mukaan 2 - 4 % /Humphrey et al 1992/. Materiaalin huokoisuudella tarkoitetaan tilavuuden suhdetta näytteen kokonaistilavuuteen kaavan (4) mukaisesti. Huokoisuus voidaan laskea myös kaavalla (5), jolloin täytyy tuntea materiaalin ominaispaino, jolle on kirjallisuudesta löytynyt arvoja väliltä 1,08...1,27. Taulukossa 3.3. on esitetty kirjallisuudesta löydettyjä arvoja huokoisuudelle ja huokosluvulle.

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad (4)$$

$$n = \frac{G_s\gamma_w - \gamma_t}{G_s\gamma_w} \qquad (5)$$

| | |
|---|---|
| n | on huokoisuus |
| $V_v$ | huokostilavuus ($m^3$) |
| V | kokonaistilavuus ($m^3$) |
| $G_s$ | materiaalin ominaispaino |
| $\gamma_w$ | veden tilavuuspaino ($kN/m^3$) |

Huokosluku e voidaan laskea kavoilla (6). Kun materiaalin huokoisuus n tunnetaan voidaan huokosluku laskea suoraan kaavasta (6b). Riippuvuus vallitsee myös toiseen suuntaan parametrien e ja n kesken.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V\rho_s}{m_s} - 1 \qquad (6a)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \qquad (6b)$$

$V_s$ on kiintotilavuus ($m^3$)
$\rho_s$ kiintotiheys ($kg/m^3$)
$m_s$ kiintoaineksen massa (kg)

Taulukko 3.3. *Rengasrouheen huokoisuus ja huokosluku. Kirjallisuudessa esiintyviä arvoja.*

| **Huokosluku e** | **Huokoisuus n** (%) | **Rengasrouhekoko** (mm) | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|
| 3,76 | 79 | 300 | Newcomb and Drescher 1994 |
| 1,32 | 57 | 30 | |
| 1,22-1,5 | 55-60 | 20-46 | |
| 0,925 | * 48 | 5-51 | Humphrey et al 1992, 1993 |
| 0,488 | 33 | -"- | |
| 1,114 | 53 | 20-76 | |
| 0,583 | 37 | -"- | |
| 0,833 | 45 | 10-38 | |
| 0,414 | 29 | -"- | |

* Huokoisuuden n arvot laskettu käsin huokosluvun e avulla

Taulukosta 3.3 havaitaan rengasrouheen raekoon vaikuttavan arvoihin huomattavasti. Suurikokoisella rengasrouheella on selvästi suurin huokoisuus muihin raekokoihin verrattuna. Taulukossa on myös kaksi eri arvoa samalle rouhekoolle, toinen tiivistetylle ja toinen löyhemmälle materiaalille.

## 3.2. Lujuusominaisuudet

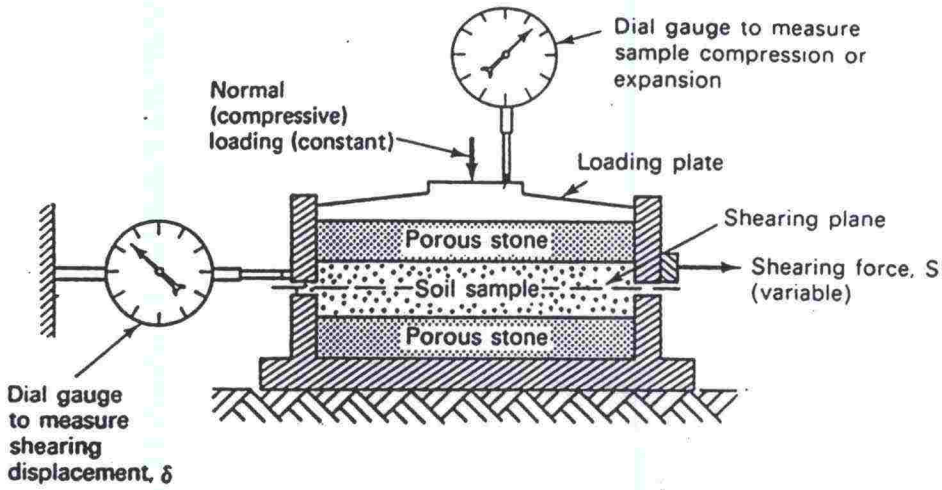
Rengasrouhemateriaalin tehokkaat lujuusparametrit voidaan määrittää laboratoriossa rasialeikkauskokeella tai kolmiaksiaalilaitteistolla. Kuvassa 3.4 esitetään kirjallisuudesta otettu rasialeikkauskokeen laitteen kuva /Humphrey et al 1992/. Leikkauskokeita on tehty myös suurikokoisilla laitteilla (40 x 40 $cm^2$), joihin on yhdistetty tietokone mittausten rekisteröimiseen. Näissä kokeissa kuorman järjestäminen on ollut hankalampaa.

Yleensä kolmiaksiaalilaitteiston koko rajoittaa kokeissa tutkittava rengasrouheen maksimiraekokoa, joka on tällä hetkellä noin 25 mm /Humhrey et al 1996/. Jos rengasrouhepaloissa esiintyy paljon teräslankoja, ne aiheuttavat ongelmia kolmiaksiaalikokeissa. Leikkauskokeessa materiaali sullotaan rakenteessa toteutuvaan tiiviyteen tai tarvittaessa lujuusparametrit määritetään eri tiiviyksissä.

Rengasrouhemateriaalille voidaan käyttää murtokriteerinä maamekaniikassa yleisesti käytettyä Mohr-Coulombin murtokriteeriä kaavan (7) mukaisesti, jossa materiaalin leikkauslujuus muodostuu kitkasta ja koheesiosta.

$$\tau = c' + \tan\phi' \qquad (7)$$

$c'$ tehokas koheesio c'
$\phi'$ tehokas kitkakulma




Kuva 3.4. *Rengasrouheen lujuusominaisuudet. Kuva rasialeikkauskokeen testilaitteista /Humphrey et al 1992/.*

Taulukossa 3.4. on esitetty kirjallisuudesta saatuja lujuusparametrien arvoja. Parametrejä tarvitaan määritettäessä kevennetyn tiepenkereen vakavuutta murtumista vastaan. Erään tutkimuksen mukaan koheesion c' ottaminen huomioon suunnittelun geoteknisissä laskelmissa on arveluttavaa, sillä koheesion kehittymiseen kokeissa tarvitaan niin suuria muodonmuutoksia. Koheesiota c käytetään yleensä ns. 'sovitusparametrinä', jonka avulla määritetään kitkakulma leikkauskokeen $\sigma$-$\tau$ -kuvaajasta.

Rengasrouheelle eri kokeilla määritetyt tehokkaan kitkakulman arvot ovat suhteellisen pieniä, vaikka materiaali pysyy hyvin suuren kitkan ansiosta melko jyrkkäluiskaisessa kasassa. Tämä johtuu mahdollisesti materiaalin suuresta anisotrooppisuudesta. Esimerkiksi rasialeikkauskokeessa materiaali leikkautuu eri tavalla kuin maastossa mahdollisesti tapahtuvassa oikeassa liukusortumassa.

Taulukko 3.4. *Rengasrouheen lujuusominaisuudet. Tehokkaat lujuusparametrit rasialeikkauskokeista. Kirjallisuudessa esiintyviä arvoja.*

| **Koheesio c'** (kPa) | **Kitkakulma $\phi'$** (o) | **Rengasrouhekoko** (mm) | **Materiaalin tuottaja** | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|---|
| 7,7 | 21 | max. 51 mm | Pine-State | Humphrey et al. 1993 |
| 4,3 | 26 | -"- | -"- | |
| 11,5 | 19 | max 38 mm | F&B Enterprises | |
| 8,6 | 25 | max 76 mm | Palmer chips | |

Rengasrouheelle on tehty myös kolmiakselikokeita (Ahmed 1993). Seuraavassa taulukossa 3.5 on esitetty näiden kokeiden tuloksena määritetyt lujuusparametrit. Koheesion yksikkönä on taulukossa psi= 6,89 kPa.

Taulukko 3.5. *Rengasrouheen lujuusominaisuudet. Lujuusparametrit kolmiakselikokeista /Ahmed 1993/.*

| Test No. | Size of Chips (in.) | Compaction | Dry Density (pcf) | Strain Levels (%) | a (psi) | tan ( α ) | $r^2$ | c (psi) | φ [4] (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TPC01 | 1.00 | Modified | 42.33 | 5 | 2.46 | 0.1303 | 0.9967 | 2.48 | 7.49 |
| TPC02 | 1.00 | Modified | 42.85 | 10 | 3.46 | 0.2472 | 0.9975 | 3.57 | 14.31 |
| TPC03 | 1.00 | Modified | 43.73 | 15 | 4.50 | 0.3372 | 0.9998 | 4.78 | 19.71 |
| | | | | 20 | 5.16 | 0.4173 | 0.9999 | 5.68 | 24.66 |
| TPC04 | 1.00 | Standard | 40.39 | 5 | 2.13 | 0.1446 | 0.9824 | 2.15 | 8.31 |
| TPC05 | 1.00 | Standard | 41.13 | 10 | 3.11 | 0.2526 | 0.9897 | 3.21 | 14.63 |
| TPC06 | 1.00 | Standard | 40.68 | 15 | 3.73 | 0.3470 | 0.9935 | 3.98 | 20.30 |
| TPC07 | 1.00 | Standard | 41.57 | 20 | 4.36 | 0.4277 | 0.9976 | 4.82 | 25.32 |
| TPC08 | 1.00 | Standard | 40.45 | | | | | | |
| TPC09 | 1.00 | 50% Standard | 40.10 | 5 | 2.07 | 0.1700 | 0.9997 | 2.10 | 9.79 |
| TPC10 | 1.00 | 50% Standard | 40.35 | 10 | 3.60 | 0.2173 | 0.9999 | 3.69 | 12.55 |
| | | 50% Standard | | 15 | 4.51 | 0.3024 | 0.9997 | 4.73 | 17.60 |
| TPC11 | 1.00 | | 40.26 | 20 | 4.99 | 0.3854 | 0.9997 | 5.41 | 22.67 |
| TPC12 | 0.50 | Standard | 39.99 | 5 | 1.92 | 0.1200 | 0.9998 | 1.94 | 6.89 |
| TPC13 | 0.50 | Standard | 39.05 | 10 | 3.23 | 0.1949 | 0.9995 | 3.29 | 11.24 |
| TPC14 | 0.50 | Standard | 39.00 | 15 | 4.17 | 0.2737 | 0.9989 | 4.34 | 15.88 |
| | | | | 20 | 4.86 | 0.3495 | 0.9986 | 5.19 | 20.46 |

Notes:
1. Modified = Modified Proctor Energy = 56,250 ft-lb/ft³
2. Standard = Standard Proctor Energy = 12,375 ft-lb/ft³
3. 50% Standard = 50% of Standard Proctor Energy = 6,188 ft-lb/ft³
4. See Figure 6.50 for definition & relationship between a, tan(α), c, tan(φ)

Suunnittelua varten voisi antaa seuraavia ohje-arvoja rengasrouheen lujuusparametrien soveltamisesta alustaviin geoteknisiin laskelmiin:

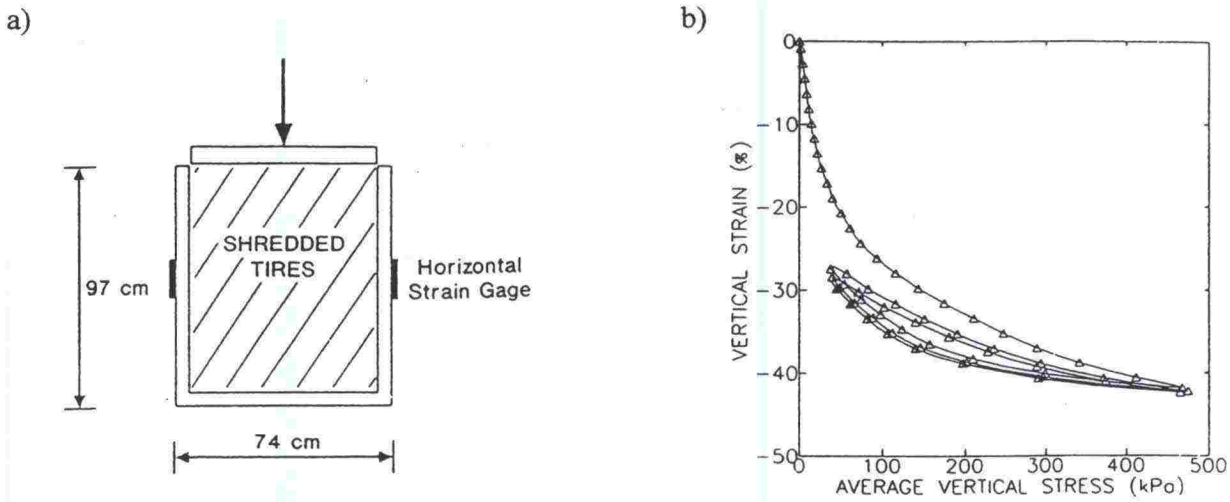
- *vakavuuslaskelmissa* $c = 0$
  $\phi = 25...28\,°$
- *elementtimenetelmät* $c = 4...8$ kPa
  $\phi = 19...25\,°$

Tämän esiselvityksen liitteessä 2 on esitetty keväällä -97 tehtyjen rasialeikkauskokeiden tulokset. Kitkakulman ja koheesion lisäksi määritettiin näytteiden kuivatiheys. Kokeet suoritti VTT:n Yhdyskuntatekniikan laboratorio.

## 3.3. Muodonmuutosominaisuudet

Muodonmuutos- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksien määrittäminen luo rungon rengasrouheen geotekniselle mitoitukselle, painuma-analyysiin ja päällysrakenteen mitoitukseen. Rengasrouhe-rakenteen mekaanisesta käyttäytymisestä on vielä liian vähän tietoa ja rakenteen vaikutuksista päällysrakenteeseen ymmärretään vielä huonosti /Newcomb and Drescher 1993/.

Rengasrouheen muodonmuutosominaisuudet voidaan määrittää laboratoriossa kolmiakselikokeella tai yksinkertaisemmin ödometrikokeella. Kuvassa 3.5a on esitetty kaaviomainen kuva testilaitteesta. Käytetyt testilaitteet ovat huomattavasti suurempia kuin Suomessa tällä hetkellä. Poikkeuksena ödometreissä on lisäksi horisontaalisten siirtymien ja jännitysten mittaaminen.




Kuva 3.5. *Rengasrouheen muodonmuutosominaisuudet. a) Kaaviokuva ödometrikokeen testilaitteesta /Newcomb and Drecher 1994/. b) pystysuora jännitys $\sigma_1$ pystysuoran muodonmuutoksen $\varepsilon_1$ suhteen /Humphrey et al 1993/.*

Ödometrikokeet ovat osoittaneet, että alhaisilla vertikaalijännitysten $\sigma_1$ arvoilla (7-55kPa) puristumat $\varepsilon_1$ ovat suuria (n.10-20 %). Muodonmuutokset pienenevät oleellisesti jännitystason kasvaessa /Drescher and Newcomb 1994/. Kuvassa 3.5b on esimerkkinä erään rengasrouheen (Pine State) ödometrikokeen tuloksista tulostettu pystysuora jännitys $\sigma_1$ pystysuoran muodonmuutoksen $\varepsilon_1$ suhteen. Kuvaajasta havaitaan materiaalin deformoituminen pienillä vertikaalijännitysten arvoilla. Kokeessa on tehty myös kuorman palautus ja uudelleen kuormitusportaita, ja ne on kuvattu kuormasykleinä.

Elastiset parametrit M, E, $K_o$ ja $\nu$ voidaan laskea koemittauksista vertikaalisten ja horisontaalisten jännitys-muodonmuutosten avulla. Parametri M on kokonpuristuvuusmoduuli, joka ei huomioi maapohjassa vallitsevaa anisotropiaa jännitysten ja muodonmuutosten suhteen. M voidaa määrittää kaavalla (8) ottaen huomioon oikea jännitysalue.

$$M = \frac{\Delta\sigma_{av1}}{\Delta\varepsilon_1} \qquad (8)$$

ja $\varepsilon_3 = 0$

$\Delta\sigma_{av1}$ on keskimääräinen pystyjännityksen lisäys, kPa
$\Delta\varepsilon_1$ pystysiirtymän lisäys jännityslisäyksestä $\Delta\sigma_{av1}$

Rengasrouheen kimmomoduuli E voidaan määrittää Lambe ja Whitmanin (1969) perusteella seuraavalla riippuvuudella moduulista M ja Poissonin vakiosta $\nu$ (kaava 9).

$$E = \beta_o M = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} M \qquad (9)$$

Rengasrouheen vaakasuuntainen maanpainekerroin eli lepopainekerroin $K_o$ ja Poissonin vakio $\nu$ määritetään kimmoteorian perusteella ödometrikokeista (kuva 3.5) tai kolmiakselikokeista, joissa vaakasuuntaiset jännitykset on mitattu. Kerroin $K_o$ voidaan määrittää kaavalla (10)

$K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ ja $\varepsilon_3 = 0$ (10)

$\sigma_h$ on vaakasuuntainen jännitys, kPa

$\sigma_v$ pystysuuntainen puristava jännitys, kPa

$\varepsilon_3$ vaakasuuntainen muodonmuutos

Poissonin luvulla tarkoitetaan jännityksen aiheuttamien vastakkaissuuntaisten muodonmuutosten suhdetta (kaava 11). Poissonin vakio ν voidaan yleisesti määrittää kaavalla (11). Vakio voidaan laskea suoraan kaavalla (12), kun $K_0$ tunnetaan.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (11)$$

$$\nu = \frac{K_o}{1+K_o} \quad (12)$$

Taulukossa 3.6. on erään tutkimuksen perusteella määritetyt elastiset parametrit M, E, $K_0$ ja ν /Humphrey et al 1992/. Tutkimuksen pääpaino oli tutkimus rengasrouheen soveltumisesta kevyeksi taustatäytöksi tukiseinille ja -muureille. Lepopainekertoimen avulla voidaan mitoittaa tukiseiniä ja -muureja. Rengasrouheen pienen tukiseinäpaineen johdosta saadaan mitoitettua ohuempia tukiseinärakenteita.

Taulukon 3.6 moduuli E on määritetty suoraan moduulin M ja Poissonin vakion ν avulla. Merkintä D tarkoittaa moduulia M ja merkintä μ Poissonin vakiota ν. Tyypillinen E-moduulin arvo pelkälle yhdelle kumipartikkelille on 7 MPa, mikä on noin 5-20 kertaa vähemmän kuin tyypillisellä maamateriaalilla. Taulukoissa 3.7 ja 3.8 on lisäksi esitetty muissa tutkimuksissa esiintyneitä arvoja elastisille parametreille.

Taulukko 3.6. *Rengasrouheen muodonmuutosominaisuudet. Elastiset parametrit. Moduulit M ja E (kN/m2), lepopainekerroin $K_0$ ja Poissonin vakio ν /Humphrey and Sandford 1993/.*

| Supplier | Test No. | $K_0$ | μ | D (kPa) | E (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Pine State Recycling | 1 | 0.55 | 0.35 | 1340 | 830 |
| | 2 | 0.33 | 0.25 | 1690 | 1390 |
| | 3 | 0.34 | 0.25 | 1390 | 1160 |
| | Average | 0.41 | 0.28 | 1470 | 1130 |
| Palmer Shredding | 1 | 0.29 | 0.22 | 790 | 700 |
| | 2 | ----- | ----- | 2510 | ----- |
| | 3 | 0.22 | 0.18 | 1740 | 1530 |
| | Average | 0.26 | 0.20 | 1680 | 1120 |
| F&B Enterprises | 1 | 0.40 | 0.29 | 1040 | 480 |
| | 2 | 0.55 | 0.36 | 1240 | 740 |
| | 3 | 0.45 | 0.31 | 1520 | 1100 |
| | Average | 0.47 | 0.32 | 1270 | 770 |

1 kPa = 0.1450 psi

Taulukko 3.7. *Rengasrouheen muodonmuutosominaisuudet. Kimmomoduuli E (kPa). Kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.*

| **Moduuli E** ($kN/m^2$) | **Koemenetelmä** | **Rengasrouhekoko** (mm) | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|
| 780 | Ödometrikoe | 30 mm | Newcomb and Drescher 1994 |
| 776<br>1623 | Ödometrikoe<br>anisotrooppisuus huomioitu | keskim. koko 50 mm | Drescher and Newcomb 1994 |

Taulukko 3.8. *Rengasrouheen muodonmuutosominaisuudet. Lepopainekerroin $K_0$ ja Poissonin vakio ν. Kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.*

| **Lepopaine-kerroin $K_0$** | **Poissonin vakio ν** | **Rengasrouhekoko** | **Materiaalin tuottaja** | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|---|
| 0,44 | - | 2-51 mm | Sawyer environm. | Manion and Humphrey 1992 |
| 0,4<br>-<br>- | -<br>0,39<br>0,45 | keskim. 50 mm | Maust Tire Recycl. | Drescher and Newcomb 1994 |
| 0,45 | - | keskim. 30 mm | - | Newcomb and Drescher 1994 |

3.4. Hydrauliset ominaisuudet

Tiivistettyjen rengasrouhekerrosten vedenläpäisevyydet ovat suurempia kuin karkealla soralla ($k_{sora}$= 0,1-1,0 cm/s). Huokospaineen muodostuminen materiaaliin on pientä, joten tiepenkereen läpi suotautuvat vedet eivät jää rengasrouhekerrokseen. Tämän ansiosta rengasrouhe soveltuu hyvin rakennuspohjan kuivatuskerrokseksi. Huonosti vettä läpäisevien maakerrosten yhteydessä materiaali tarjoaa vedelle lyhyemmän suotomatkan ja voi nopeuttaa konsolidaatio-prosessia.Rengasrouhetta on käytetty kuivatusrakenteena kaatopaikkojen rakennekerroksissa.

Veden läpäisevydellä tarkoitetaan pintayksikön suuruisen poikkileikkauksen kautta virtaavan veden määrää hydraulisen putouksen ollessa yksi (kaava 13), mikä määrittää Darcyn lain laminaarisella virtausalueella.

$$v = ki \qquad (13)$$

v on veden nopeus
k vedenläpäisevyys eli Darcyn kerroin, cm/s
i hydraulinen putous, cm

Laboratoriossa vedenläpäisevyys k voidaan määrittää vakioputouslaitteella, jolla yleensä määritetään kitkamaalajien vedenläpäisevyys-arvoja.

Taulukkoon 3.9 on koottu kirjallisuudessa esitteyjä vedenläpäisevyys-arvoja. Kaikki k -arvot on määritetty laboratoriossa. Osassa taulukkoa on esitty myös materiaalin tilavuuspaino, jolla on vaikutusta vedenläpäisevyyteen. Tiivimmällä materiaalilla on selvästi pienempi k-arvo. Joissakin testeissä on voitu käyttää rengasrouheen päällä päällysrakenteen kuormaa.

Taulukko 3.9. *Rengasrouheen hydrauliset ominaisuudet. Vedenläpäisevyys k. Kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.*

| **Vedenläpäisevyys k (cm/s)** | **Irtotiheys ρ (kg/m³)** | **Rengasrouhekoko** | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|
| 5,3-23,5<br>2,9-10,9<br>4,9-59,3<br>3,8-22 | 469<br>608<br>470<br>610 | 25-64 mm<br>25-64 mm<br>5-51 mm<br>5-51 mm | Bressette 1984 |
| 7,7<br>2,1<br>15,4<br>4,8<br>6,9<br>1,5 | 644<br>833<br>601<br>803<br>622<br>808 | 5-51 mm<br>-"-<br>20-76 mm<br>-"-<br>10-38 mm<br>-"- | Humphrey et al.<br>1992<br>1993 |
| 0,58 | - | 10-38 mm | Ahmed 1993 |
| 1,4-2,6<br>0,8-2,6 | -<br>- | 38 mm<br>19 mm | Humphrey 1996 |
| 0,54-0,65<br>2,07<br>1,93 | -<br>-<br>- | 25 mm<br>38 mm<br>19 mm | Ahmed and Lovell<br>1993 |

## 3.4. Lämpötekniset ominaisuudet

Tutkimusten mukaan rengasrouhe on sopiva materiaali tierakentamisen routaeristeeksi /Humphrey 1996/. Rengasrouheen lämmönjohtavuus on merkittävästi pienempi kuin tavanomaisten maarakennusmateriaalien ja maalajien arvot. Lämmönjohtavuus -arvojen tutkimusta ei ole kirjallisuudessa esiintynyt montaa. /Shao et al 1995/ ovat tutkineet rengasrouhetta , jonka rakeisuus on välillä 1-25 mm. Humphrey ja Eaton ovat määrittäneet lämmönjohtavuuden takaisinlaskennalla testikohteesta /Humphrey and Eaton 1993a, 1993b, 1994, 1995/.

Tierakentamisen lisäksi Kubo (1997) on tutkinut rengasrouheen soveltuvuutta betonisten tunneleiden routaeristeeksi. Taulukossa 3.10. on lyhyesti esitetty näiden kolmen tutkimuksen tulokset.

Taulukko 3.10. *Rengasrouheen lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönjohtavuus λ. Kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.*

| **Lämmönjohtavuus λ (W/Km)** | **Rengasrouhekoko** | **Määritysmenetelmä** | **Kirjallisuuslähde** |
|---|---|---|---|
| 0,0974<br><br>0,171 | 1 mm<br><br>25 mm | laboratoriossa (löyhä tiiviys)<br>laboratoriossa (w=5%+ tiivistys) | Shao et al. 1995 |
| 0,23 | max 51 mm | takaisinlaskenta koekohteesta | Humphrey and Eaton (1993a,b, 1994,1995), Humphrey et al. 1997 |
| 0,14 | keskim. 25 mm | laboratoriossa (γ= 6 kN/m3 ja w=5%) | Kubo 1997 |

Taulukossa 3.11. on esitetelty vertailu eri routaeristeiden osalta ns. paksuuskertoimella, joka määrittää suunnitelmassa käytettävän rengasrouheen paksuuden tapauksessa, jolloin solumuovin kerroin on 1. Vertailussa on solumuovin lisäksi kevytsora ja palaturve. Solumuovi on routaeristeistä kallein ja halvimpia ovat palaturve ja rengasrouhe. Materiaalien vertailua on lisää luvussa 4.1.1. Kevennysmateriaali.

Taulukko 3.11. *Rengasrouhe routasuojamateriaalina. Routaeristeiden vertailu. Paksuuskerroin.*

| **ROUTAERISTE** | **Lämmönjohtavuus λ (W/Km)** | **PAKSUUSKERROIN** |
|---|---|---|
| Solumuovi | 0, 035 | 1 |
| Kevytsora | 0, 15 | 4,3 |
| Palaturve | 0,45 | 12,9 |
| Rengasrouhe | 0,20 | 5,7 |

# 4. RENKAIDEN KÄYTTÖKOHTEET

## 4.1. Tie- ja katurakenteet

### 4.1.1. Kevennysmateriaali

Autonrenkaista valmistettavaa rengasrouhetta on käytetty etenkin Yhdysvalloissa /Ahmed and Lovell 1993/ tiepenkereiden keventämiseen huonosti kantavilla maapohjilla. Rengasrouheen käytöstä on hyviä kokemuksia mm. Coloradossa /Bosscher et al 1992/, Minnesotassa /Lamb 1992/, Oregonissa /Read et al 1991/ sekä Wisconsinissa /Edil et al 1990 /. Tulokset materiaalin soveltamisesta kevennystarkoitukseen edellä mainituissa kohteissa ovat olleet lupaavia, vaikka lisätutkimusta materiaalin mekaanisista ominaisuuksista kaivataan vielä lisää.

Tyypillisiin maarakennusmateriaaleihin verrattuna rengasrouheella on pieni tilavuuspaino. Materiaali ei myöskään absorboi mainittavasti vettä itseensä ja sen vedenläpäisevyys-arvo on suurempi kuin soralla. Nämä edellä mainitut sekä materiaalin pysyvyys-ominaisuus tekevät materiaalista kevennystarkoitukseen sopivan. Materiaaliominaisuuksia on tarkemmin käsitelty luvussa 3. Rengasrouhe on lisäksi kilpailukykyinen hinnaltaan verrattuna esimerkiksi laajalti käytettyyn kevytsoraan. Taulukossa 4.1. on lyhyesti esitetty vertailun vuoksi rengasrouheen, kevytsoran ja palaturpeen ja tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia sekä arvio materiaalin kustannuksesta. Taulukon 4.1 kustannukset riippuvat tilattavasta materiaalimäärästä ja kuljetusmatkasta ja -tavasta.

Taulukko 4.1. *Rengasrouheen hyödyntäminen tie- ja katurakenteissa. Kevennysmateriaalien ominaisuuksia. Kevytsora, palaturve ja rengasrouhe. Vertailu.*

| **Kevennysmateriaali/ Materiaaliominaisuus** | **KS 432** | **Palaturve** | **Rengasrouhe** |
|---|---|---|---|
| Irtotiheys ρ (kg/m$^3$)<br>- kuivana<br>- märkänä | <br>250-350<br>400 | <br>300 *<br>1300 ** | <br>300- 800***<br>(ei vaikutusta) |
| Vesipitoisuus w (%) | 5-12 (til-%) | < 35 (p-%) **** | 0 |
| Huokoisuus n (%)<br>(lajittelematon) | 85-88 | - | 55-60 |
| Kitkakulma ϕ (°) | 33-37 | 30-40 | 20-27 |
| Kustannus (mk/m$^3$)<br>(karkea arvio) | 150-185 | 40-55 | 40-80 |

* w = 30 %
** w = 200 %
*** riippuu tiivityksestä/päällysrakenteen painosta
**** toimituskosteus (= veden massa/märän näytteen massa)

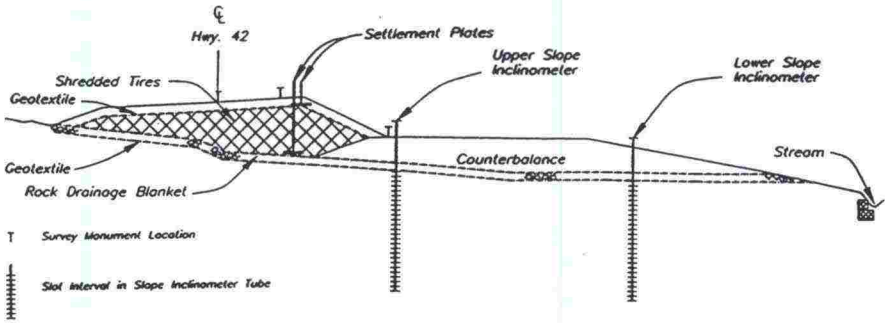
Haluttaessa pienentää maapohjalle maarakenteista syntyvää kuormitusta voidaan tie- tai katurakenteeseen käyttää rengasrouhetta korvaamaan raskaita kiviainesmateriaaleja. Rengasrouheen määrä ja tarvittava kerrospaksuus riippuvat kevennystarpeesta eli kuinka paljon lisäkuormitusta on pienettävä haitallisten painumien tai maapohjan murtumisen estämiseksi.

Kevennyksiin yleisimmin käytetty kumirouhe on raekooltaan noin 10-75 mm. Keskiarvona voidaan pitää raekokoa 40-50 mm. Pienempi raekoko mahdollistaa rakenteen paremman tiivistymisen ja näin vältytään tierakenteen suuremmalta painumiselta pitkällä aikavälillä.

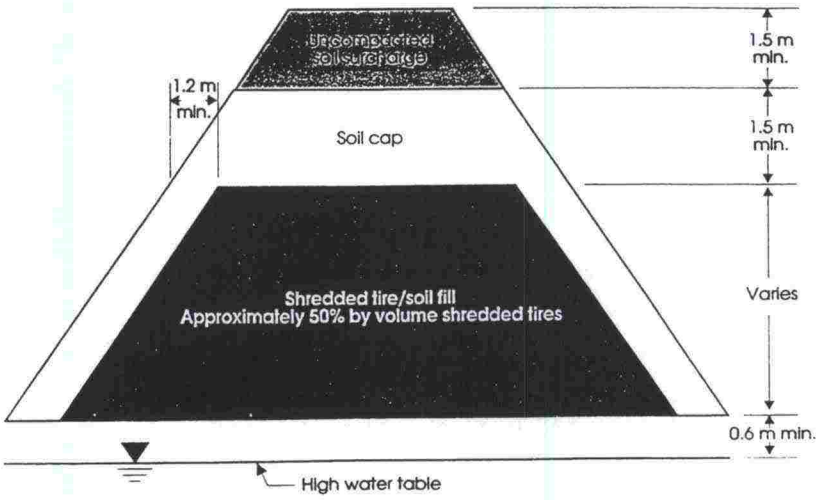
Tie- ja katurakentamisessa rengasrouhekevennys voidaan valita seuraavissa tapauksissa :
1. pengerkuorman keventäminen (kuva 4.2)
2. kuormituksen kokonaiskeventäminen (kuva 4.1)
3. epätasaisten painumien estäminen ja painumaerojen tasaaminen (siirtymärakenteet)
4. putkijohtojen ja katujen keventäminen

Jyrkkiä ja haitallisen suuria painumaeroja muodostuu erityisesti pehmeikköjen reuna-alueilla, pohjanvahvistusten muutoskohdissa sekä siltojen, rumpujen ja putkijohtojen kohdilla. Tällöin rengasrouherakenne voidaan suunnitella ns. siirtymäkiilana tasoittamaan painumaeroja. Tie- ja katurakentamisen lisäksi voidaan olettaa rengasrouheen soveltuvan myös samoihin kohteisiin kuin kevytsora eli piha-alueiden ja perustuskaivantojen sekä erilaisten pientalojen kevennykseksi. Näitä sovellutuksia tulisi kuitenkin tutkia lisää laskelmin ja koerakentein. Kirjallisuudessa ei ole viitteitä tällaisista rengasrouheen sovellutuskohteista.

Seuraavissa kuvissa 4.1 ja 4.2 on periaatekuvia rengasrouheen käytöstä eri kevennystarkoituksiin. Kuvassa 4.1 on esitetty kuormituksen kokonaiskeventäminen (päällysrakenteen paksuus 1,6 m) ja kuvassa 4.2 puolestaan pengerkuorman keventäminen.




Kuva 4.1. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Periaatekuva rengasrouheen sijoittamisesta eri kavennystapauksiin. Kokonaiskuormituksen vähentäminen /Upton and Machan 1993/.*




Kuva 4.2. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Periaatekuva rengasrouheen sijoittamisesta eri kavennystapauksiin. Pengerkuorman vähentäminen /Hoppe 1994/.*

4.1.2. Kevennyksen mitoittaminen

Tiepenkereen suunnittelun tavoitteena on saavuttaa tieluokasta riippuen tavoiteltava kantavuus päällysrakenteen päältä niin, että myös penkereen vakavuus murtumista vastaan on riittävä ja painumat pysyvät sallituissa rajoissa ottaen huomioon penkereelle suunniteltu geometria. Jos painumat muodostuvat haitallisen suuriksi ja vakavuus ei ole riittävä ja pengerkorkeutta ei voida laskea riittävästi, voidaan pehmeiköille rakennettava tiepenger perustaa rengasrouheesta tehtävän kevennyksen varaan.

4.1.2.1. Vakavuus

Tiepenkereen rakennusajan ja pitkän ajan vakavuus täytyy tarkistaa liukupinta-laskelmalla. Vakavuuslaskelmiin tarvitaan rengasrouheen parametreistä tilavuuspaino $\gamma$ ja kitkakulma $\phi$ . Varmuus murtumista vastaan avoimessa tilassa (pitkän ajan vakavuus) tulee olla $F_d \geq 1{,}5$. Vaatimus rakennusajan vakavuuden osalta on $F_u \geq 1{,}3$. Tarvittaessa penkereen geometriaa muutetaan siten, että tarvittava varmuus saavutetaan.

4.1.2.2. Painuminen

Tiepenkereen lyhyen ja pitkän ajan painuman tulee pysyä sallituissa rajoissa Tielaitoksen ohjeiden mukaisesti. Rengasrouhe-kerros painuu suurimmaksi osaksi heti rakennusaikana. Kirjallisuuden mukaan /Ahmed and Lovell 1993/ kumirouhe on painunut noin 10-15 % kerrospaksuudestaan heti rakentamisen ja tiivistystyön jälkeen ja tien käyttöaikana painuminen on ollut huomattavasti vähäisempää. Tyypillinen laboratoriossa rengasrouheelle määritetty kokoonpuristuvuuskäyrä kertoo 3 mekanismiä kokonaispainuman luonteesta:

1) Ensimmäisellä kuormasyklillä tapahtuu kumipalojen uudellen järjestäytyminen tiiviimmäksi rakenteeksi. Muodonmuutokset suurimmaksi osaksi palautumattomia.
2) Kokoonpuristuvuus jatkuu rengasrouhepalojen litistymisen ansiosta. Muodonmuutokset suurimmaksi osaksi palautuvia.
3) Viimeinen vaihe puristumisessa on kerroksen elastiset muodonmuutokset, jolloin painuma on pientä ja kaikki muodonmuutokset palautuvia.

Rengasrouheesta tehdyn tiepenkereen rakenteen painuma voidaan laskennallisesti määrittää normaalilla geotekniseen suunnitteluun käytettävillä painumanlaskenta-ohjelmilla, joissa kevennetty penger huomioidaan pelkkänä kuormana. Painuma olisi myös mahdollista laskea kehittyneemmillä menetelmillä, joissa voisi hyödyntää penkereen ja kevennyksen jäykkyyttä ja lujuutta. Materiaalin kokoonpuristuvuus-parametrejä laskelmia varten tulisi selvitellä ja tutkia laboratoriossa vielä lisää. Koekohteista /Bosscher et al 1992/ on kuitenkin tietoa mitatuista todellisista painumista, jotka riippuvat päällysrakenteen paksuudesta.

4.1.2.3. Päällysrakenne

Kantavuusvaatimus päällysrakenteen päältä määräytyy rakennettavan tien luokan mukaan. Tielaitoksen ohjeiden mukaisesti tien luokat ovat päällysrakenneluokat 1-6 ja lisäksi erillinen jalankulku- ja pyörätie. Päällysrakenteen mitoitukseen vaikuttaa kuormittavan liikenteen lisäksi oleellisesti maapohjan kantavuus. Mitä heikompi maapohja on, sitä paksummat rakennekerrokset tarvitaan saavuttaakseen tarvittava kantavuus. Kantavuus voidaan laskennallisesti määrittää mm.

Odemarkin kantavuuskaavaan perustuvilla laskentaohjelmilla (esim. FULGEO-Kantavuus), joissa tarvitaan lähtötietoina rakennekerrosten E-moduuleja. Rengasrouheen E-moduuli tulisi määrittää tarkemmin laboratoriossa. Virhettä laskelmissa saattaa aiheuttaa ohjelmien oletus rakennemateriaalin isotrooppisuudesta, kun kumirouhe on huomattavan ansiotrooppinen materiaali.

Rengasrouhemateriaali on erittäin joustavaa ja kimmoisaa ja suuren kokoonpuristuvuutensa johdosta päällysrakenteen paksuus saattaa olla jopa 1,5 - 2 m /Upton and Machan 1993/. Paksu päällysrakenne lisää puolestaan painumia, joten rengasrouheen osalta mitoittaminen on optimointitehtävä. Päällysteeksi kannattaa valita joustavampi asfalttibetoni, koska rengasrouheen huomattava kokoonpuristuvuus ja jousto saattavat aiheuttaa ennenaikaisen väsymismurtuman kovilla päällysteillä /Newcomb and Drescher 1994/. Tien kantavuus tulisi rakentamisen aikana tarkistaa pudotuspainolaitteella ja tarvittaessa lisätä päällysrakenteen paksuutta. Jos tien tasausviivaa ei voida muuttaa ja tien kantavuus ei muodostu riittäväksi, voidaan jäykistys tehdä maabetonilla.

Kumirouhe ei sovellu kantavan tai jakavan rakennekerroksen materiaaliksi suuren joustavuutensa johdosta. Päällysrakenteen paksuuden valinta onkin erittäin tärkeä osuus tierakenteen kevennysmitoituksen yhteydessä, jotta rakenteen päältä tarvittava kantavuus saavutetaan eikä päällysteen muodonmuutokset kehity liian suuriksi. Lisää tutkimustietoa päällysrakenteen mitoittamisesta on esitetty esimerkiksi kirjallisuuslähteissä /Humphrey and Nickels 1997/, /Edil and Bosscher 1992/ , /Humphrey and Manion 1992/ ja /Manion and Humphrey 1992/.

4.1.2.4. Routa

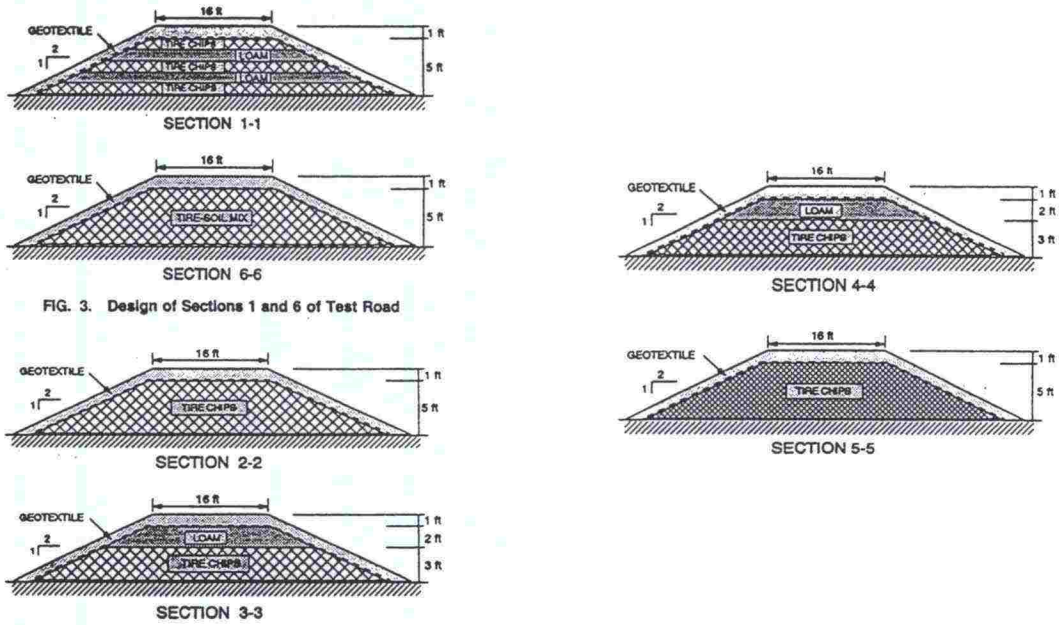
Kumimateriaali on erittäin hyvä lämmöneriste. Tutkimusten mukaan se vähentää roudan tunkeutumista pohjamaahan jopa puoleen normaalista / Humhprey and Eaton 1993/. Kevennyskohteissa rengasrouhekerroksen paksuus on yleensä niin suuri, että roudasta ei muodostu rakennetta mitoittavaa tekijää. Rengasrouheen käyttöä routaeristeenä on kerrottu luvuissa 4.1.4 sekä luvussa 4.6.2.

4.1.3. Täyttömateriaali

Rengasrouhetta on Yhdysvalloissa käytetty tierakenteissa penkereen täytemateriaalina eli materiaalia ei ole käytetty penkereen keventämiseen. Jäterenkaita kertyy Yhdysvalloissa noin 240 miljoonaa vuodessa. Määrän tehokas hyödyntäminen on vaikeaa. Tämän takia on etsitty keinoja, joilla rengasrouhetta voidaan hyödyntää suuria määriä ilman teknistä hyötytarkoitusta.

Rengasrouhetta on hyödynnetty täytteenä pelkästään, mutta myös sekoitettuna eri maa-aineksiin. Maa-aineksena on käytetty enimmäkseen hiekkaa ja moreenia. Eräässä koekohteessa on kokeiltu 'mixturen' lisäksi rengasrouheen ja maa-aineksen kerrostamista päällekkäin ohuilla kerroksilla (d = 0,3 m) /Bosscher et al 1992/. Materiaalien sekoituksille on tehty myös laboratoriotutkimuksia /Edil and Bosscher 1994/. Mixturea käytettäessä rakenteen kokoonpuristuvuus ei ole niin suuri kuin pelkkää rengasrouhetta käytettäessä, vaikka tällöin vedenläpäisevyys on pienempi.

Kuvassa 4.3. on esitetty Wisconsinissa toteutetun koekohteen testipenkereiden kuvat. Kohteessa rengasrouhe toimi pelkkänä kevyenä täytemateriaalina ja päällysrakenteen paksuus vaihteli välillä 0,3-0,9 m. Kuvan mittayksikkö 1 ft = 0,3 m (penkereen kokonaiskorkeus 1,8 m).




Kuva 4.3. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevyenä täyttömateriaalina. Koekohde Wisconsinissa. Testiosuuksien suunnittelu /Bosscher et al 1992/.*

### 4.1.4. Routasuoja

Maan jäätyminen ja routaantuminen täytyy huomioida maa- ja pohjarakeiden suunnittelussa sekä maa- ja pohjarakennustöiden toteutuksessa talvioloissa. Maan jäätyminen ja etenkin routiminen aiheuttavat useissa tapauksissa merkittäviä vaurioita teiden, katujen ja rautateiden rakenteisiin sekä muihin maarakenteisiin. Maa routaantuu, kun maan huokosissa oleva vesi jäätyy. Routimisesta puhutaan tapauksessa, jolloin maapohjassa olevan huokosveden jäätymisestä aiheutuu imu, jonka seurauksena jäätymisvyöhykkeeseen virranneen veden jäätyminen aiheuttaa huokoisuuden kasvun ja routanousun. Routimisen voimakkuuteen vaikuttavat lähinnä mineraalipartikkeleiden ominaisuudet, maan huokoisuuden jakautuminen sekä maan vedenläpäisevyys ja vesipitoisuus. Maalajeista siltit ja hienorakeiset moreenit ovat hyvin routivia.

Keväällä roudan sulaessa vesi vapautuu ja sulavan maan kantavuus sekä muodonmuutosvastus heikkenevät. Routanousun lisäksi sulavan maan pehmeneminen onkin merkittävä ongelma etenkin tie- ja liikennealueilla. Tien rakennekerrokset tehdään yleensä routimattomista materiaaleista, joten ongelma onkin routiva pohjamaa. Kantavuuden lasku voidaan ottaa huomioon kevätkantavuuteen perustuvassa kantavuusmitoituksessa.

Tierakenne mitoitetaan kantavuuden ja routaolosuhteiden mukaan. Lähtökohtana on tien luokka ja maaperä- ja pohjavesisuhteet. Routivuus on muodostuu mitoittavaksi tekijäksi, jos maapohja on routivaa ja pohjavedenpinta on tasolla, jolla Tielaitoksen ohjeiden mukaisesti määritetyt routaolosuhteet ovat suotuisat roudan muodostumiselle. Tielaitoksen ohjeiden mukaan olosuhteet jaetaan 3 eri luokkaan: helpot, keskivaikeat ja vaikeat routaolosuhteet. Näissä tapauksissa tierakenteissa joudutaan yleensä käyttämään paksumpia rakennekerroksia kuin pelkän kantavuusmitoituksen antamat kerrospaksuudet. Joissain tapauksissa, kun otetaan huomioon kohteen merkittävyys ja teknistaloudelliset näkökohdat, on järkevää vähentää rakennekerrosten paksuutta ja asentaa rakenteeseen erityinen routasuojaus. Tierakenteen lämpöeristeenä käytetään yleisimmin solumuovia, mutta myös kevytsoraa ja erilaisia voimalaitoskuonia voidaan käyttää

eristeenä. Näiden em. eristeiden lisäksi olisi mahdollista hyödyntää rengasrouhetta tehokkaana routasuojausmateriaalina.

Rengasrouhe on tutkimusten mukaan tehokkaasti tierakennetta eristävä materiaali /Eaton et al 1994/. Routaeristyskäyttö perustuu materiaalin alhaiseen lämmönjohtavuuteen ja suureen vedenläpäisevyyteen. Rouheen lämpöteknisiä ominaisuuksia ei ole vielä laajalti tutkittu laboratoriossa eikä koekohteilla. Luvussa 3. on mainittu kirjallisuudesta löytyneet rengasrouheen lämmönjohtavuuden arvot, jotka ovat lähes samaa luokkaa kuin tierakenteissa tavanomaisesti käytetyillä eristysmateriaaleilla (kevytsora, palaturve, solumuovi). Rengasrouheen routaeristyskäytöstä on tarkemmin kerrottu luvussa 4.6 Koerakenteet, jossa kuvaus on v. 1992 Richmondissa, Mainessa valmistuneesta koekohteesta ja sen rakentamisesta, instrumentoinnista ja routahavainnoista /Eaton et al 1994/.

Rakenteen routamitoitus voidaan tehdä Tielaitoksen perinteisellä menetelmällä, jossa eristekerroksen paksuus määritetään pakkasmäärän ja roudan sallitun tunkeutuman perusteella. Laskelmiin tarvitaan pakkasmäärän lisäksi materiaalin lämmönjohtavuusarvo ja vesipitoisuus. Analyyttisellä menetelmällä olisi mahdollista määrittää routanousun suuruus pakkasmäärän ja pohjamaan perusteella. Tällöin tarvitaan yleensä numeerisia , yhdistettyyn massan ja lämmön siirtymiseen perustuvia laskentamalleja. Routanousun laskemiseen on myös käytetty routimisen voimakkuutta kuvaavaa ns. segregaatiopotentiaalikäsitettä.

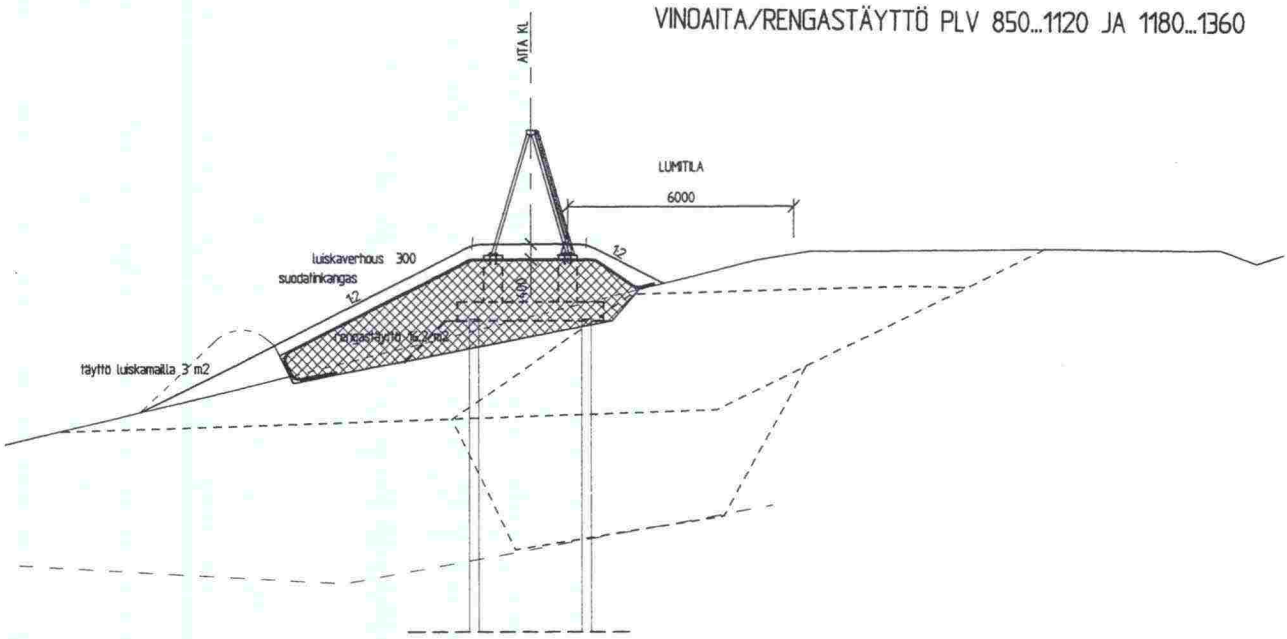
## 4.2. Meluvallit

Auton renkaista valmistettavaa rengasrouhetta (RR1, RR2) on mahdollista hyödyntää keventävänä materiaalina sekä pelkkänä täytemateriaalina pehmeiköille rakennettavissa meluvalli-rakenteissa. Myös kokonaisten renkaiden (RR0) käyttö on mahdollista. Teknis-taloudellisesti ajatellen kokonaisten renkaiden ja RR1-rouheen (suurikokonen rengasrouhe) käyttö on järkevämpää näissä rakenteissa kuin kalliimmalla valmistusmenetelmällä tehdyn RR2-rengasrouheen käyttö.

Maamateriaalista rakennettavat meluvallit ovat yleensä niin korkeita, että rakenteen vakavuus tulee mitoittavaksi tekijäksi. Tämän vuoksi on järkevää keventää rakenne rengasrouheella, jottei rakenteen kustannukset nouse kohtuuttoman suuriksi jouduttaessa muuten käyttämään esim. kevytsorakevennystä tai paaluperustusta.

Kirjallisuudessa on tekstinä mainittu mahdollisuus rengasrouheen hyödyntämisestä meluvalleihin ja -esteisiin. Yhtään artikkelia ei ole löytynyt, jotka käsittelisivät näiden em. rakenteiden teknisiä ratkaisuja ja niiden rakentamista. Kokonaisia renkaita on kuitenkin käytetty luonnonluiskien vahvistamiseen ja luiskien eroosiosuojina. Lisäksi kanavaluiskia on vahvistettu renkailla. Luvussa 4.3 on kerrottu näiden em. käyttökohteista tarkemmin.

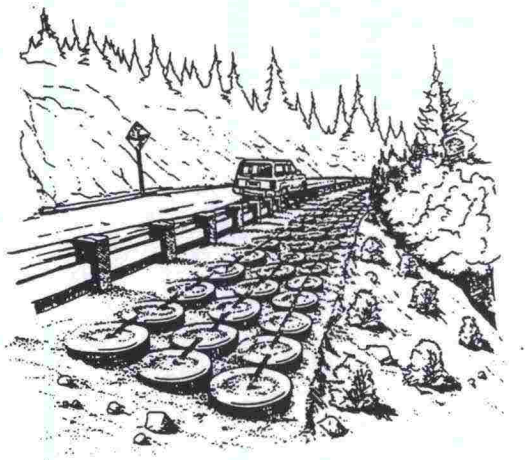
Kuopion läheisyyteen Siilinjärvelle valtatie 5:n varrelle on suunniteltu melueste, jossa tullaan käyttämään kierrätysrenkaita rakennusmateriaalina. Huonosti kantavalle maapohjalle rakennettava meluestekohde on koeluonteinen ja rakentaminen sijoittuu kesään 1997. Kohteessa hyödynnetään kokonaisten renkaiden lisäksi lentotuhkaa ja ratapölkkyjä. Työstä saaduista kokemuksista laaditaan raportti jatkokäyttöä varten. Kuvassa 4.4 on esitetty periaateellinen tapa renkaiden sijoittamisesta meluvalliin Siilinjärven kohteessa. Kohteen on suunnitellut Kuopion Viatek.




Kuva 4.4. *Rengasrouheen hyödyntäminen meluvalleissa. Periaatekuva meluvallin rakenteesta /Viatek-Kuopio 1997/.*

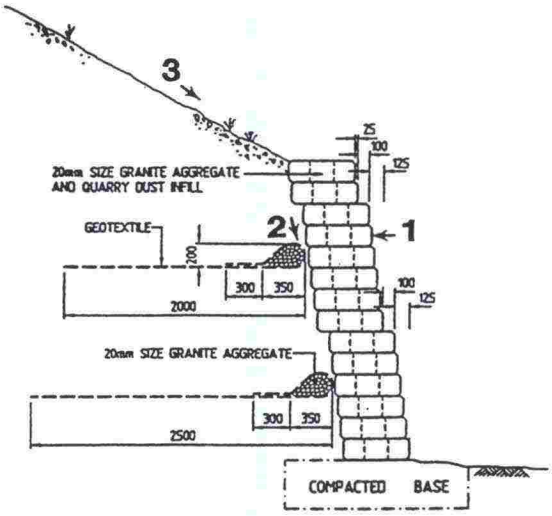
## 4.3. Luiskien vahvistaminen

Kokonaisia autonrenkaita voidaan hyödyntää maarakenteissa myös erilaisiin vahvistaviin ratkaisuihin. Kirjallisuuden perusteella renkailla on vahvistettu erilaisia luonnonluiskia ja kanavaluiskia ja lisäksi niitä on käytetty erityisinä luiskien eroosiosuojauksina (esim. vuoristoiset alueet). Kuvissa 4.5 - 4.7 on esitetty eräitä esimerkkejä mahdollisuuksista hyödyntää kokonaisia renkaita. Renkaat voidaan vahvistusrakenteissa jättää näkyviin, mutta ne voidaan myös peittää maamassalla ja ne soveltuvat hyvin erilaisen kasvillisuuden alustaksi. Renkaista voidaan muodostaa hyvin jyrkkiäkin luiskan vahvistusmuureja kuten kuvasta 4.6a voidaan havaita. Erilaisissa vahvistusrakenteissa käytettäville renkaille on kehitetty myös erilaisia menetelmiä, joilla ne voidaan sitoa yhteen rakenteen toimivuuden parantamiseksi /Caltrans 1988/. Erään tutkimuksen mukaan /Lesko et al 1984/ renkaan kulutuspinta on leikkaamalla erotettu sivupinnoista (2 leikattua osaa), joita on sitten hyödynnetty maan veto- ja leikkauslujuutta lisäävänä vahvisteena.

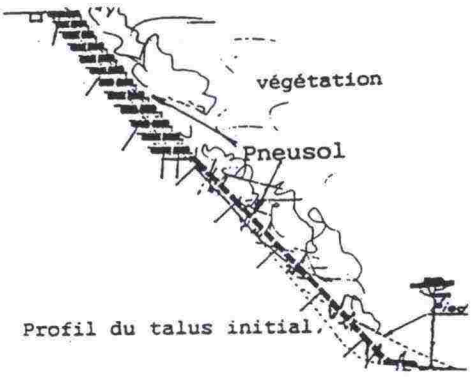


Kuva 4.5. *Eroosiosuojaus kokonaisilla renkailla / Caltrans 1988/.*

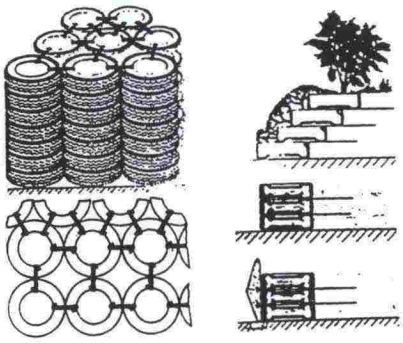
a) */Basheer and Najjar 1996/*



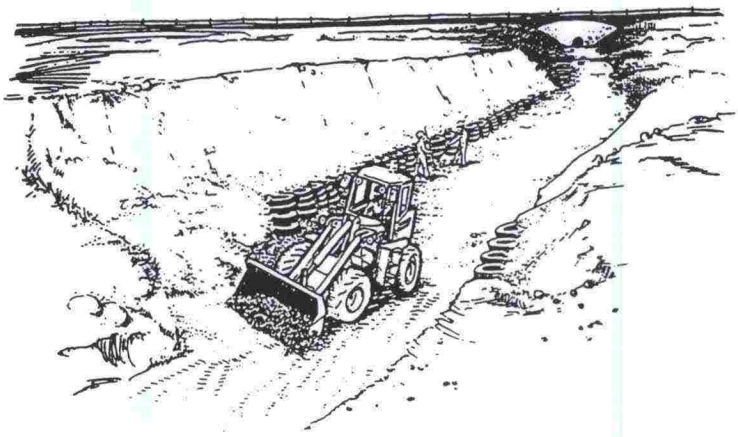

b) */Lareal et al. 1995/*




c) */Cartier et al. 1995/*



Kuva 4.6. *Kokonaisten renkaiden hyödyntäminen maarakenteissa. Esimerkkejä luiskien vahvistamisesta kokonaisilla renkailla a)-c).*



Kuva 4.7. *Kokonaisten renkaiden hyödyntäminen maarakenteissa. Kanavaluiskan tukeminen kokonaisilla autonrenkailla /Caltrans 1988/.*

## 4.4. Kaatopaikat

Suomessa on valmisteilla kaatopaikkojen rakentamista ja hoitoa koskeva valtioneuvoston päätös (julkaistaan v.1997). Päätöksen tavoitteena on parantaa jätteiden sijoittamista kaatopaikoille siten, ettei niistä pitkänkään ajan kuluessa aiheudu vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. Päätöksessä annetaan määräyksiä ja ohjeita jätteiden sijoittamisesta ja esikäsittelystä sekä kaatopaikkojen sijoituksesta, vesien ja kaasujen hallinnasta, maaperän ja vesien suojelusta, jälkihoidosta, valvonnasta ja tarkkailusta.

Kaatopaikoille sijoitetaan erilaisia jätteitä, joiden lävitse sade- ja pintavesien johdosta suotautuu ns. kaatopaikkavettä, jota on myös muu kaatopaikoilla eri tavoin muodostuva likaantunut vesi. Kaatopaikoilla jätteistä syntyy myös erilaisia kaasuja. Näitä kaatopaikoilla muodostuvia vesiä ja kaasuja täytyy kerätä tai kierrättää niin, ettei niistä koidu ongelmia ympäristöön ja pohjavesiin.

Kaatopaikkavedet on kerättävä yhteen soveltuvin teknisin ratkaisuin kuten salaojilla ja pumppauskaivoilla. Kaatopaikkavesien määrä on pyrittävä pitämään mahdollisimman pienenä. Kerätyt kaatopaikkavedet on puhdistettava tehokkaasti kaatopaikalla tai johdettava muualle puhdistettaviksi. Kaatopaikkavesiä voidaan myös kierrättää jätepenkereessä haihdunnan ja jätteiden hajoamisen tehostamiseksi sekä vesien käsittelemiseksi. Myös kaatopaikkaveden käsittelyssä muodostuneita lietteitä ja sakkoja voidaan sijoittaa jätepenkereeseen. Kaatopaikkakaasu on kerättävä ja tarpeen mukaan puhdistettava sekä hyödynnettävä. Jos kaasua ei voida käyttää energia tuottamiseksi, on se käsiteltävä polttamalla.

Yhdysvalloissa on suuren jäterenkaiden määrän vuoksi alettu kehittää voimallisesti renkaiden eri käyttötapoja laajentaen niiden hyödyntämistutkimusta myös kaatopaikkojen rakenteisiin. Kokonaisten renkaiden sijoittaminen kaatopaikoille jätteenä on myös Suomen tavoin monissa osavaltioissa lailla kiellettyä. New Yorkissa kaatopaikka-yhtiö Modern /Goehrig 1996/on kehittänyt ja tutkinut menetelmiä, joilla voisi hyödyntää renkaista valmistettavaa rengasrouhetta kaatopaikkarakentamisen yhteydessä. Tutkimusten mukaan renkaita voisi kaatopaikoilla hyödyntää seuraaviin eri tarkoituksiin /Janek and White 1996/:

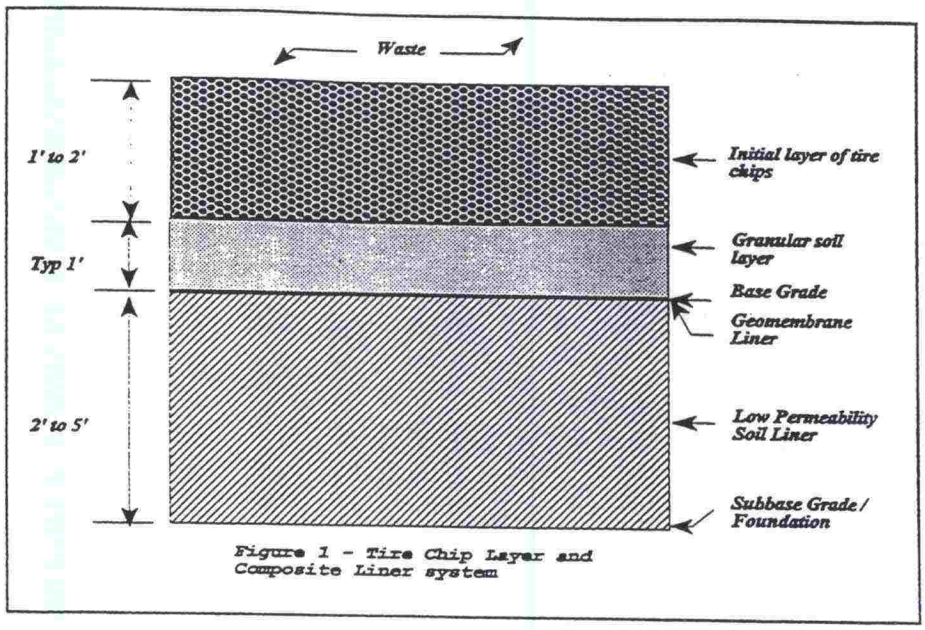
1. Suojaava peitekerros salaojaputkelle (kuva 4.9)
2. Salaojakerroksena kaatopaikan kuivatusjärjestelmässä (kuva 4.8)
3. Kuivatuskerroksena (pintavedet) lopetettaessa kaatopaikan toiminta (kuva 4.10)
4. Kaatopaikkateiden rakenteissa materiaalina
5. Kaatopaikkakaasujen keräysjärjestelmässä

Rengasrouheen hyödyntämistä kuivatusjärjestelmässä voidaan perustella materiaalin suurella vedenläpäisevyydellä ja kemiallisella kestävyydellä. Materiaalille on kaatopaikkakoerakenteiden yhteydessä tehty laboratorioselvityksiä fysikaalisten ominaisuuksien (rouheen mitat, massa, tilavuus, kovuus, vedenläpäisevyys)ja jätevesien mahdollisesti aiheuttaman liukenevuuden suhteen /Duffy 1996/. Modern-kaatopaikalla kokeiltavalle rengasrouheelle /Goehrig 1996/ suoritettiin 9090-soveltuvuustesti , joka on tarkoitettu määrittelemään jätteistä liekenevien kemikaalien vaikutuksia kaatopaikkojen rakennekerroksien materiaaleihin. Testit suoritettiin 2 eri lämpöolosuhteissa (23°, 55°).

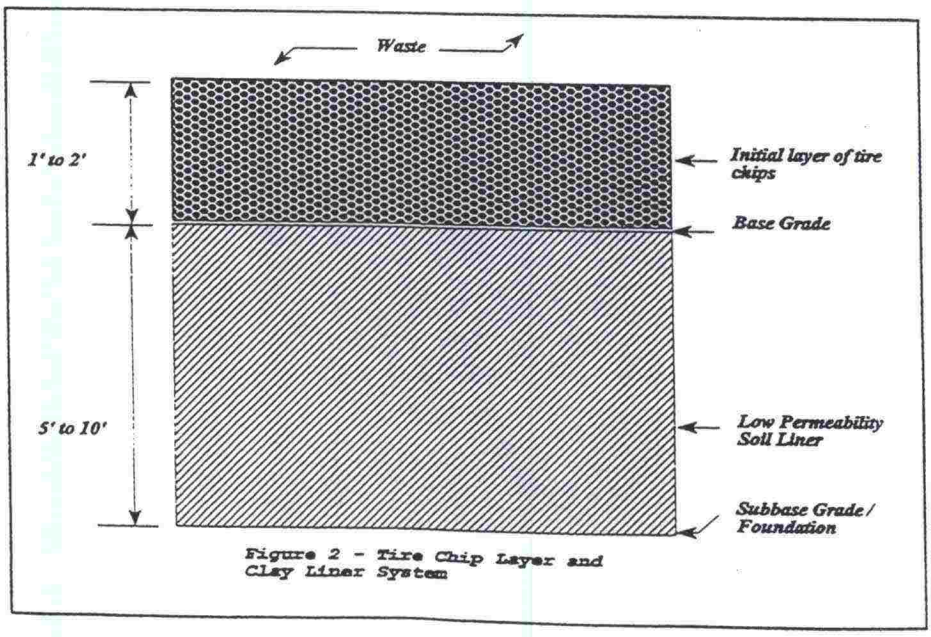
Yhdysvalloissa vaatimus salaojituskerroksen vedenläpäisevyden osalta on $k \geq 1 \times 10^{-2}$ cm/s. Suomessa vaaditaan kaatopaikkavesien keräämistä varten kaatopaikan pohjarakenteen päälle kuivatuskerros, jonka paksuus on vähintään 0,5 m.

Kuvassa 4.8 esitetty rengasrouheen hyödyntämistä kaatopaikkojen salajituskerroksena, jota pitkin suotovedet ohjautuvat mahdolliseen keräyspaikkaan. Kuvassa 4.8a) pohjaeristeenä toimii sekä läpäisemätön geokalvo että huonosti vettä läpäisevä maakerros (soil liner). Tällöin tarvitaan myös geokalvon ja rengasrouheen väliin karkearakeinen materiaali (huom. teräkset). Kuvassa 4.8b pohjaeristeenä ei ole kuin maakerros (esim. savi), joka suojaa varsinaista pohjamaata suotovesien rasituksilta. Käytettäessä rengasrouhetta yhdessä karkearakeisen salaojamateriaalin kanssa, kerrosten paksuudet ovat vähintään 30 cm molemmille materiaaleille.

a)

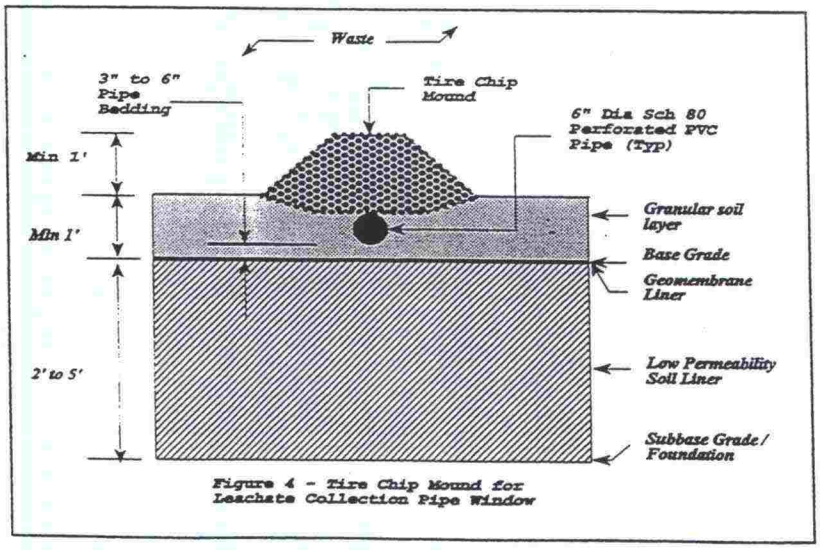



b)



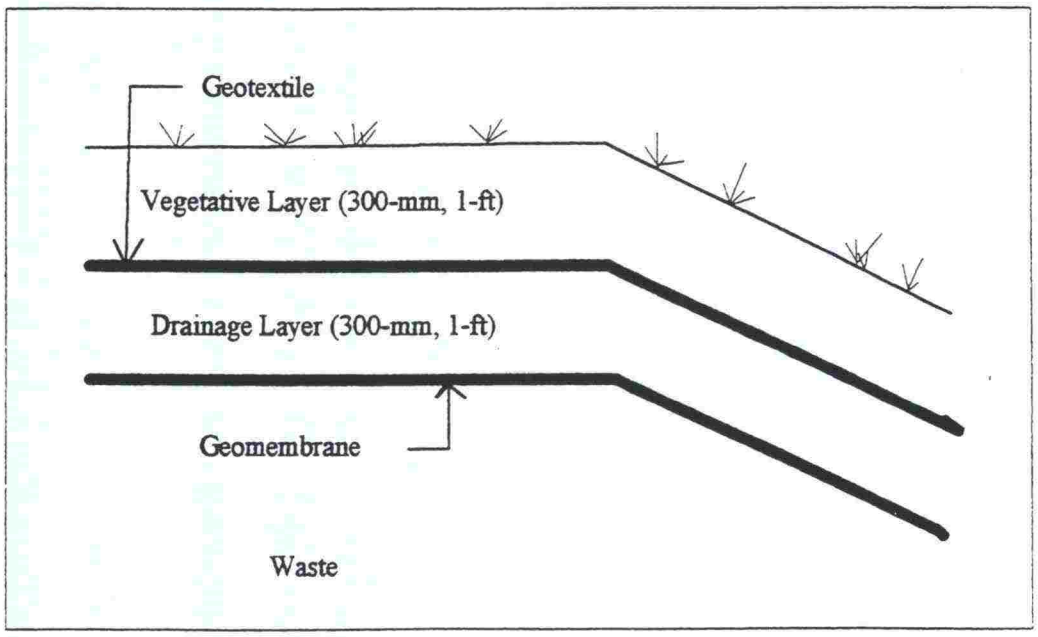

Kuva 4.8. *Rengasrouheen hyödyntäminen kaatopaikkarakenteissa. Rengasrouhe salaojituskerroksena kuivatusjärjestelmässä, a) pohjaeriste: geokalvo+ maatiiviste (soil liner) b) pohjaeriste: maatiiviste /Duffy 1996/.*

Kuvassa 4.9. on esitetty rengasrouheen mahdollinen hyödyntäminen peitemateriaalina varsinaiselle salaojaputkelle. Näissä tapauksissa täytyy suunnittelussa huomioida rengasrouheesta mahdollisesti ulos työntyvät teräslangat, jotka saattavat vaurioittaa putkea. Jos varsinainen kuivatusjärjestelmä on tehty geokalvosta, niin rengasrouhetta ei voi suoraan rakentaa kalvorakenteen päälle.




Kuva 4.9. *Rengasrouheen hyödyntäminen kaatopaikkarakenteissa. Suojaava täytemateriaali kaatopaikkavesien keräysputkelle (salaojaputki) /Duffy 1996/.*

Kaatopaikan täyttökorkeuden tultua täyteen ja lopetettaessa kaatopaikan toiminta peitetään jätemassa yleensä vesitiiviillä pintarakenteella. Yhdysvalloissa on kaatopaikoilla kokeiltu yhdistettyä rengasrouhe ja geokalvo -peiterakennetta kuvan 4.10. mukaisesti /Cosgrove 1996/. Pintarakenteen päälle voidaan istuttaa kasvillisuutta.




Kuva 4.10. *Rengasrouheen hyödyntäminen kaatopaikkarakenteissa. Rengasrouhe kuivatuskerroksena kaatopaikan lopullisessa peiterakenteessa /Cosgrove 1995/.*

Rakennettaessa luiskattuja kaatopaikkarakenteita otetaan suunnittelussa normaalisti huomioon rakenteen vakavuus. Rengasrouheelle voidaan laskelmia varten arvioida lujuusparametrit luvussa 3 esitetyllä tavalla. Rengasrouheesta ei pystytä rakentamaan 30 cm ohuempia rakenteita. Kaatopaikkasuunnittelussa täytyy myös huomioida rengasrouheen suuri kokoonpuristuvuus, mikä merkitsee jopa 50 %:n kokoonpuristumista suurilla kuormilla (taulukko 4.2). Taulukon vedenläpäisevyys-arvot on testattu vakioputouskokeella. Taulukkoon on merkitty psf-yksikköä vastaava arvo kPa:na ja ft-yksikköä vastaava arvo metreinä.

Taulukko 4.2. *Rengasrouheen hyödyntäminen kaatopaikkarakenteissa. Rengasrouheen vedenläpäisevyyskoe eri kuorman arvoilla /Duffy 1996/.*

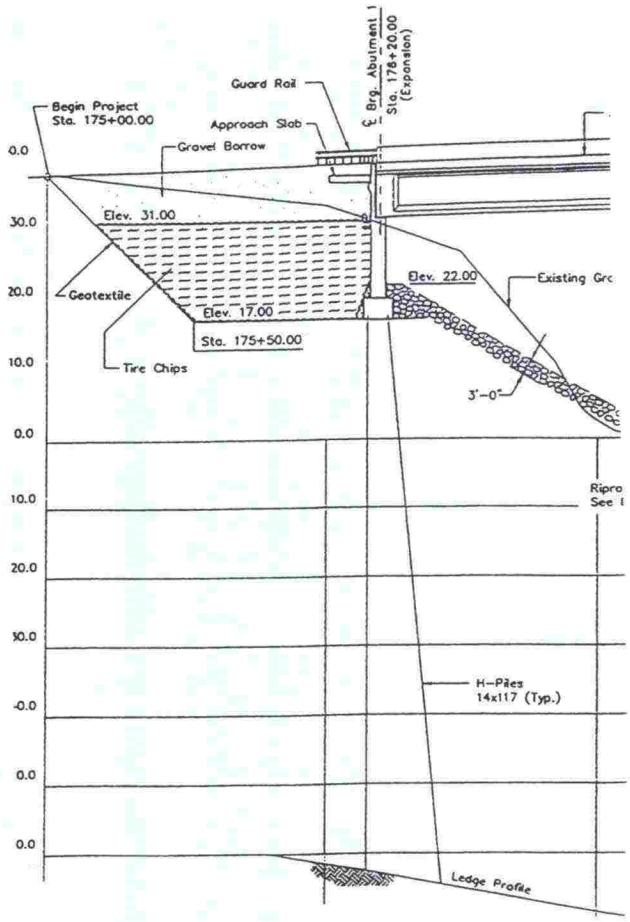
| Applied Normal Stress (psf) | Equivalent Landfill Waste Overburden Thickness (ft) | Resultant Strain (Tire Chip Layer Thickness Reduction) | Hydraulic Conductivity (cm/sec) |
|---|---|---|---|
| 2,500 (120 kPa) | 40.0 (12 m) | 25 % | $7.0 \times 10^{-1}$ |
| 5,000 (240 kPa) | 80.0 (24 m) | 36 % | $5.3 \times 10^{-1}$ |
| 10,000 (480 kPa) | 160.0 (48 m) | 46 % | $2.5 \times 10^{-1}$ |
| 15,000 (720 kPa) | 240.0 (72 m) | 49 % | $1.2 \times 10^{-1}$ |

Uusia kaatopaikkoja rakennettaessa Suomessa on lähtökohtana pidetty EU-direktiiviluonnosta ja sen perusteella luonnosvaiheessa olevia suomalaisia määräyksiä ja ohjeita. Näiden mukaan kaatopaikan pohjan tiiveys on varmistettava kaksinkertaisella mineraalitiivisteellä ja kalvorakenteesta muodostuvalla rakenteella. Kaatopaikkaa ei saa sijoittaa alueelle, jossa vastaavan kerroksen vedenläpäisevyys on suurempi kuin $k \geq 10^{-6}$ m/s.

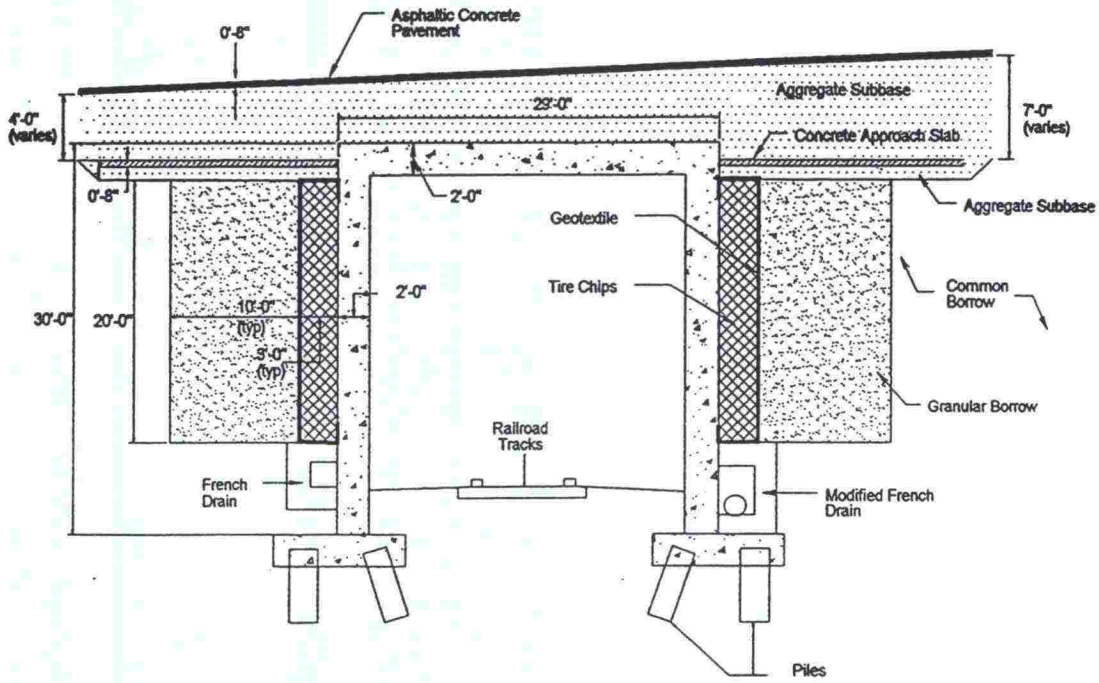
## 4.5. Tukiseinät ja -muurit

Rengasrouheen on todettu soveltuvan hyvin myös erilaisten tukiseinien ja -muurien sekä siltojen maatukien kevyeksi taustatäyttömateriaaliksi /Cecich et al 1996/. Käytettäessä materiaalia taustatäyttönä rengasrouheen teknisiä etuja ovat tukiseinään kohdistuva pienempi maanpaine (lepopainekerroin $K_o$ pieni) sekä painuman suuruuden vähentyminen tapauksissa, joissa tukiseinä on perustettu pehmeikölle. Tukimuuriin kohdistuvat pienemmät maapaineet vähentävät tukirakenteen paksuutta ja tällöin säästetään kustannuksissa. Valittaessa rengasrouhe täyttömateriaaliksi pehmeikölle rakennettavaa tukimuuria tai -seinää vasten voidaan esimerkiksi välttää rakenteen perustaminen paaluille.

Kuvissa 4.11 ja 4.12 on esitetty rengasrouheen käyttöä eräissä siltakohteissa. Esimerkeissä rakenteet on perustettu paaluille sekä molemmissa rakenteissa on rengasrouheen ympärillä käytetty geotekstiiliä. Kuvan 4.12 siltarakenne on koekohde, jossa on tehty myös instrumentointi vaakasuuntaisten jännitysten ja muodonmuutosten mittaamiseksi.




Kuva 4.11. *Rengasrouheen hyödyntäminen sillan maatuen kevyenä taustatäyttönä /Humphrey 1995, 1996/.*




Kuva 4.12. *Rengasrouheen hyödyntäminen sillan maatuen kevyenä taustatäyttönä /Humphrey et al 1997/.*

## 4.6. Koekohteet

### 4.6.1. Koekohteen suunnittelu

Koekohteen rakentamisella pyritään saamaan tietoa tutkittavan rakenteen teknisestä toiminnasta ja mahdollisista olosuhdevaikutuksista. Autonrenkaista valmistettava rengasrouhe on Suomessa uusi tierakentamiseen mahdollisesti hyödynnettävä rakennusmateriaali, jonka vuoksi sen soveltuvuutta rakentamiseen on tutkittava koekohteessa. Myös rengasrouheen ja kokonaisten renkaiden aiheuttamat vaikutukset ympäristöön on selvitettävä. Rengasrouhetta voidaan hyödyntää tierakenteissa ja muussa rakentamisessa monella eri tavalla, mutta koekohteeen suunnittelussa ei kannata huomioida liian montaa hyödyntämisvaihtoehtoa. Yleisesti koekohteen suunnitteluun kuuluvat seuraavat vaiheet:

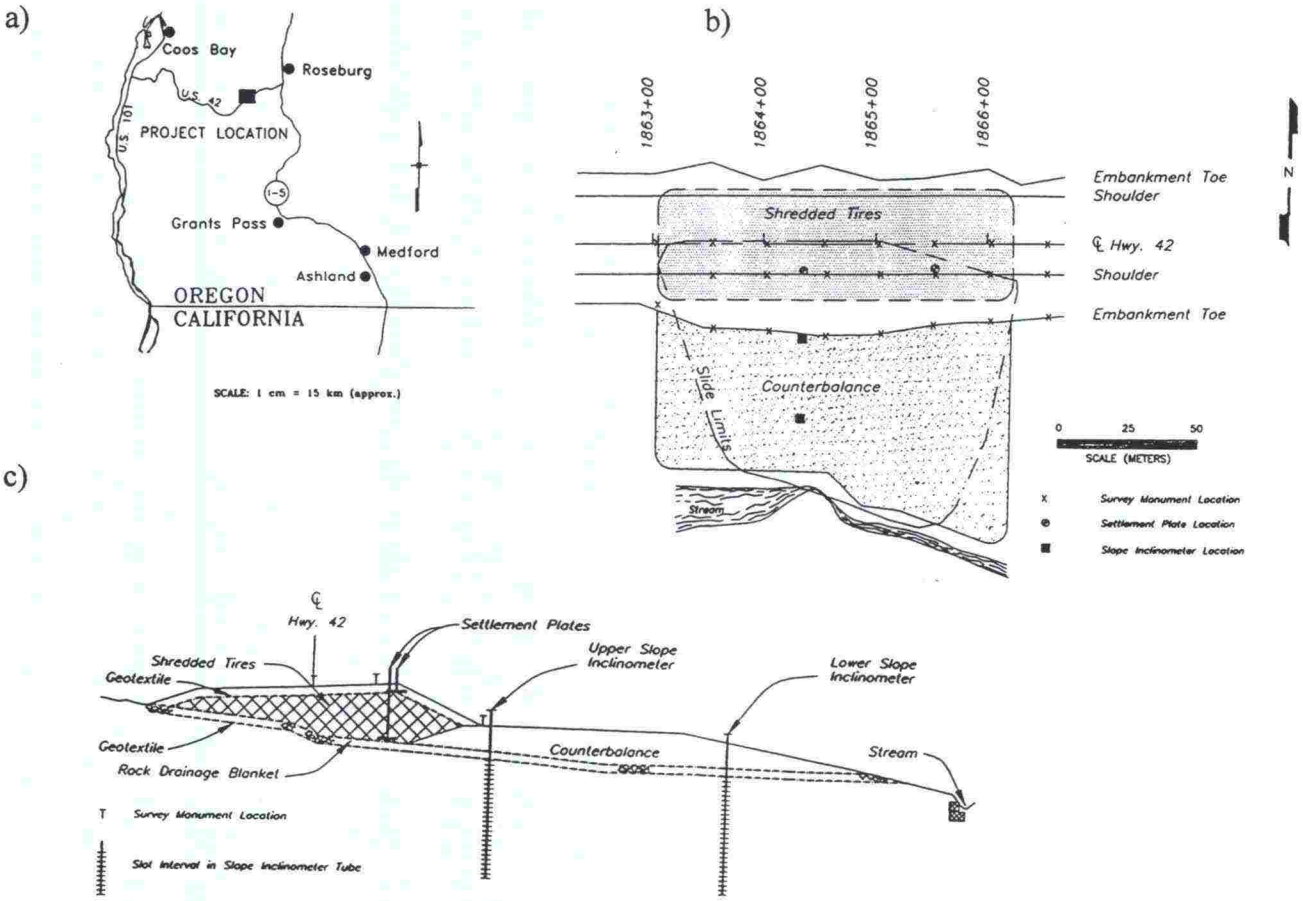
1. *Tutkimustavoitteiden asettaminen sekä tutkimussuunnitelman ja aikataulun laatiminen*
2. *Mahdolliset esiselvitykset ja -tutkimukset suunnittelua varten*
   - kirjallisuus
   - pohjatutkimukset
   - laboratoriotutkimukset (tekniset ominaisuudet, ympäristötestit)
3. *Koekohteen tekninen suunnittelu*
   - vakavuus
   - painumat
   - routa
   - päällysrakenne
   - geometria
4. *Koekohteen instrumentoinnin suunnittelu*
5. *Koekohteen rakentaminen ja rakennusajan seuranta*
6. *Kohteen jälkiseuranta ja raportointi*
   - mittaukset
7. *Mahdollinen takaisinlaskenta*
   - parametrien määrittäminen perustuen mittaustuloksiin (painumat, routa)

Yhdysvalloissa on jo vuosia hyödynnetty rengasrouhetta. Materiaalia on siellä käytetty pengerkevennyksiin ja -täyttöihin, tukimuurien taustatäyttöihin ja routasuojausrakenteiin. Tutkimustarkoitukseen on rakennettu koekohteita, joissa on suoritettu instrumentointeja painumien, siirtymien, roudan syvyyden ja ympäristövaikutusten arvioimiseksi. Koekohteiden suunnittelun kulkua ja vaiheita ei ole kirjallisuudessa kovin selvästi kuvattu. Seuraavissa luvuissa on kahden eri koekohteen kuvaus. Toinen kohde on Oregonisssa maanvieremän korjaamiseksi rengasrouheella kevennetty tiepenger /Upton and Machan 1993/ ja toinen on materiaalin hyödyntäminen routaeristeenä Richmondiin rakennetulla sorapintaisella koetieosuudella /Eaton et al 1994/. Kohteen kuvauksen lisäksi on tekstissä esitetty havaintotuloksia, joiden perusteella voidaan arvioida rengasrouheen soveltuvuutta näihin em. käyttötarkoituksiin.

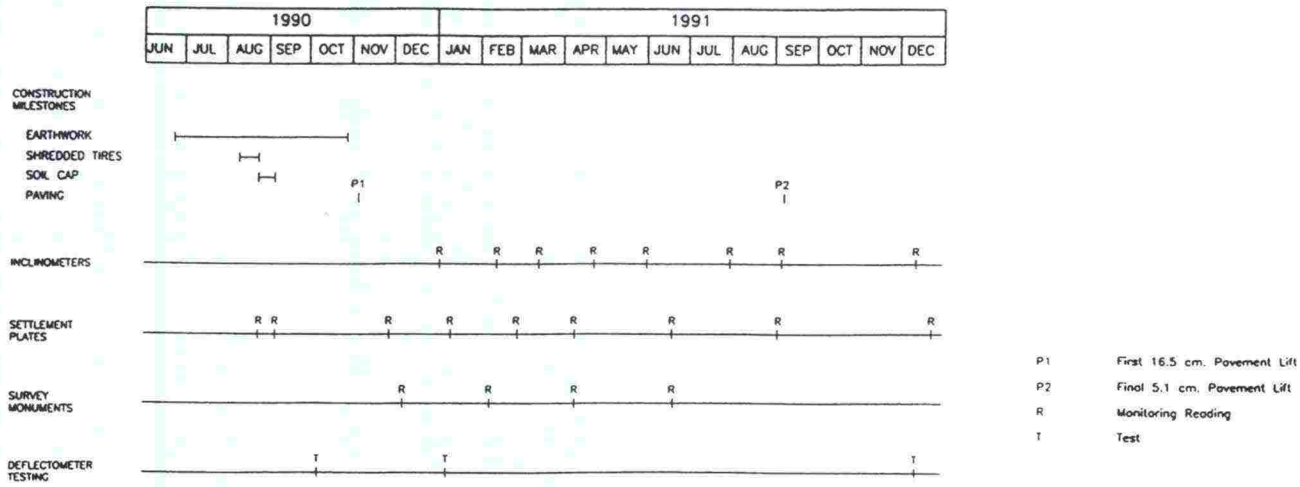
### 4.6.2. Kevennyskoekohde, Oregon

Maantie 42 varrella lounais-Oregonissa oli vuosina 1990-1991 käynnissä tien parantamisprojekti, jonka tarkoituksena oli leventää tiepengertä 6 metriä ja korottaa 1,2 metriä. Lisäkuorma aiheuttikin vanhan maanvieremän liikkumisen alaspäin, jonka vuoksi tiepenger päätettiin keventää rengasrouheella (keskim. raekoko 5 cm) ja lisäksi rakentaa vastapenger tukemaan varsinaista tierakennetta. Korjaussuunnitelma sisälsi myös kivimurskasta rakennettavan kuivatusjärjestelmän, jolla pohjavedenpinta pyrittiin pitämään rengasrouheen alapuolella. Koekohteen päätavoitteena oli

havaintojen avulla selvittää rengasrouheen soveltuvuutta tierakenteden kevennysmateriaaliksi. Kuvassa 4.13 on esitetty kartta koekohteen sijainnista sekä kohteen asemapiirros ja tyypillinen poikkileikkaus. Kuvassa 4.14. on lisäksi esitetty korjauskohteen rakentamisen ja instrumentoinnin aikataulu.




Kuva 4.13. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Koekohde, Oregon. a) Kartta korjausalueen sijainnista, b) asemapiirros ja c) poikkileikkaus kohteesta/Upton and Machan 1993/.*



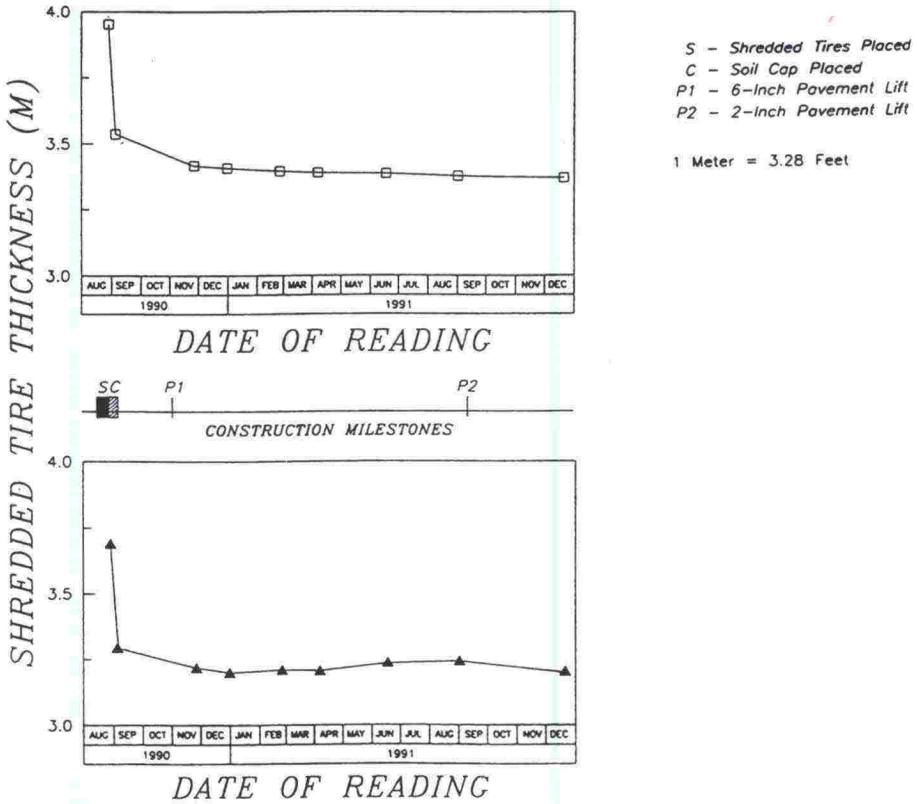

Kuva 4.14. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Koekohteen rakentamisen ja instrumentoinnin aikataulu /Upton and Machan 1993/.*

Kevennyskoekohde on instrumentoitu havaintoja ja testauksia varten. Kohteeseen asennettiin inklinometrejä, pohjavesiputkia, painumalevyjä, päällysrakenteen korkeusaseman tarkkailumittareita ja lisäksi suoritettiin päällysrakenteen päältä pudotuspainomittauksia taipuman määrittämiseksi. Havaintomittausten tarkoituksena oli selvittää rengasrouheen kokoonpuristuvuutta rakennus- ja käyttöaikana sekä päällysrakenteen ja päällysteen toimivuutta RR-kevennyksen yhteydessä (taipuma, kantavuus). Koekohteessa käytetty päällysrakenne (paksuus 1,64 m) oli seuraavanlainen:

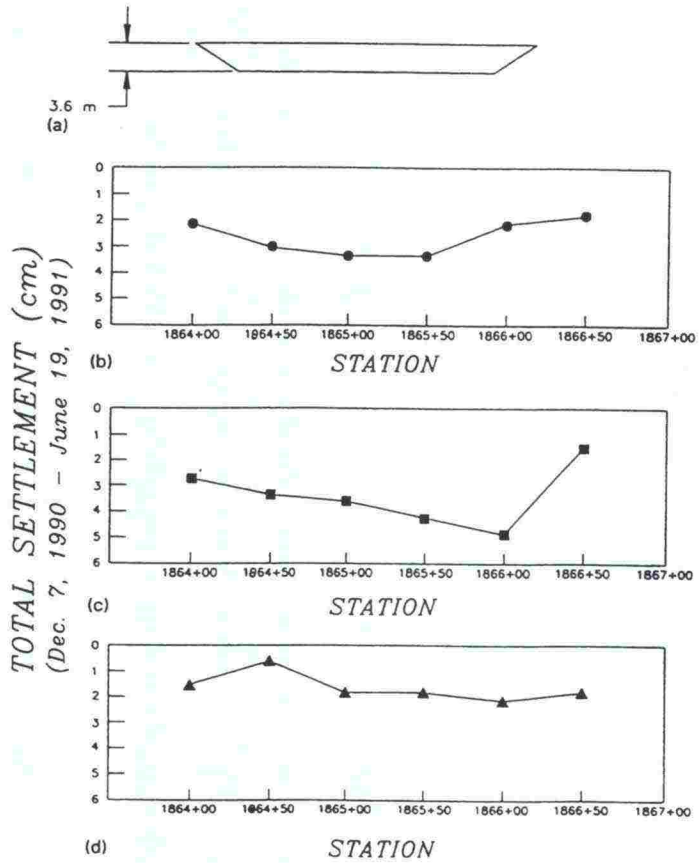
| | | |
|---|---|---|
| - | AB | 20,3 cm |
| - | kantava kerros | 53,3 cm |
| - | täytemateriaali | 90 cm |
| - | (RR2) | |

Rengasrouhekerroksen paksuus vaihteli suuresti. Keskimäärin kerroksen paksuus oli 3,6 metriä, mutta ohuemmat kerrospaksuudet olivat koeosuuksien alku- ja loppuosuudella. Kantavaan kerrokseen ja maatäytteeseen käytetystä maamateriaalin laadusta ei ole tietoa.

Kuvissa 4.15 ja 4.16 on esitetty koekohteen tuloksia painuvalevymittauksista (PL 1864 + 33.5 ja PL 1865 + 50) RR-kerroksen paksuuden ja ajan suhteessa sekä kokonaispainuman kehittyminen penkereen pituussuunnassa rakentamisen jälkeen (tammikuu-90 - kesäkuu -91). Kuvien perusteella voidaan todeta, että suurin RR-kerroksen (n.15%) painuma tapahtuu heti rakentamisen jälkeen, mutta myös pientä pidempiaikaista painumaa on myös havaittavissa. Suurimmat painumat ovat tapahtuneet testikohteen keskiosalla (kuva 4.17), jossa myös RR-kerroksen paksuus oli suurin. Tämän tulos korreloi suoraan RR-kerroksen paksuuden ja kokoonpuristumisen suuruuden välistä yhteyttä. Kokemukset koekohteen rakentamisesta ja toteuttamisesta sekä rengasrouheen soveltumisesta kevennysmateriaaliksi olivat myönteisiä. Koekohteen rakentamista ja rakentamisen aikaisia havaintoja on kuvattu lisää vielä luvussa 4.7.2.




Kuva 4.15. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Koekohde, Oregon. Painumalevymittauksien tuloksia. RR-kerrospaksuuden ja ajan suhde. a)PL 1864+33.5 b)PL 1865+50 /Upton and Machan 1993/.*



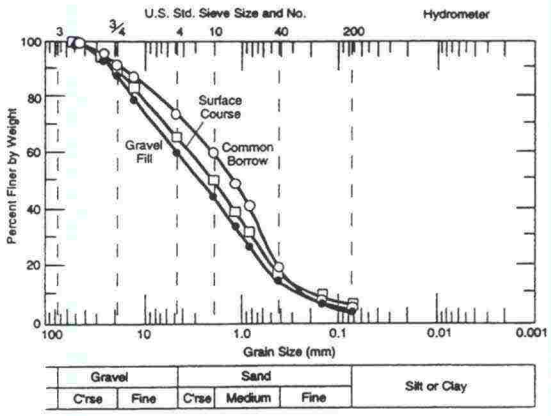

Kuva 4.16. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Koekohde, Oregon. Kokonaispainuman havaintotuloksia penkereen b) keskilinjalla c) reunassa d) luiskan juuressa /Upton and Machan 1993/.*

4.6.2. Routasuojauskohde, Maine

Koekohde sijoittuu Dingley Road -nimiselle tielle Richmondin kaupunkiin, joka sijaitsee Mainen osavaltiossa. Koeosuus on noin 350 metriä pitkä sorapintainen tie, joka päättyy umpikujaan. Pääosa tien liikenteestä on henkilö-autoja, koulubusseja ja kevyitä kuorma-autoja. Keväisin tienpinta on erittäin huonossa kunnossa, koska pohjamaa on routivaa aiheuttaen roudan sulaessa tien pinnan pehmenemistä. Myös sulava lumi lätäköityy keväällä tien pinnalle huonon kuivatuksen johdosta ja aiheuttaa vaurioita tienpintaan. Normaalisti pohjavesi on 2-3 metrin syvyydellä maanpinnasta, mutta juuri keväisin vedenpinta on hyvin lähellä maanpintaa. Vähintään 45 cm paksu alkuperäisen tien päällysrakenne muodostuu hiekkaisesta sorasta (hkSr) tai soraisesta hiekasta (SrHk). Pohjamaa on erittäin routivaa ja vaihtelee silttisestä savesta (siSa) silttiseen karkeaan hiekkaan (siHk).

Rakennetun routakoekohteen tutkimustavoitteet olivat:
1. saada tietoa eristämiseen tarvittavan rengasrouhekerroksen paksuudesta
2. tietoa päällysrakennekerroksen paksuudesta, jolla tien riittävä kantavuus saavutetaan
3. haluttiin selvittää rengasrouheen mahdollisesti aiheutamat muutokset pohjaveden laatuun

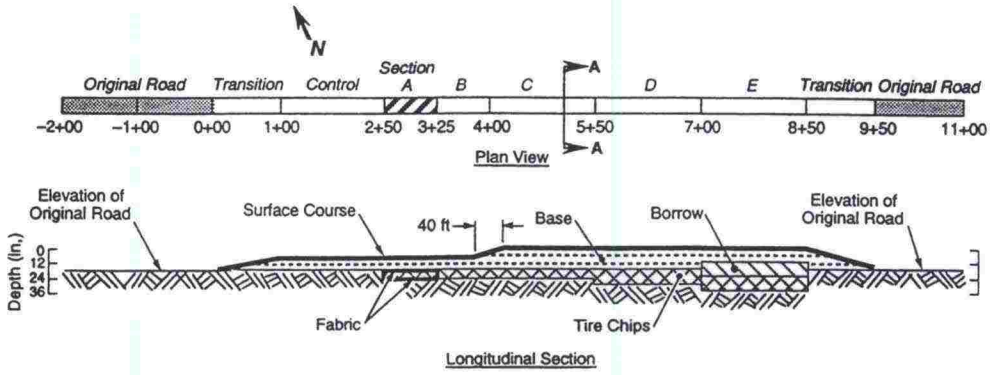
Testikohteessa käytettiin rengasrouhetta, jonka nimellismitat ovat $\leq$ 5 x 5 $cm^2$ ja materiaalina käytettiin Pine State Recycling -renkaita (kuva 3.1). Kohteeseen käytettiin yhteensä noin 20 000 rengasta. Päällysrakenteessa käytetyt materiaalit ja niiden rakeisuudet on esitetty kuvassa 4.17. Karkeana täytteenä käytetty materiaali on hieman karkeampaa kuin aivan pintakerrokseen käytetty sora.



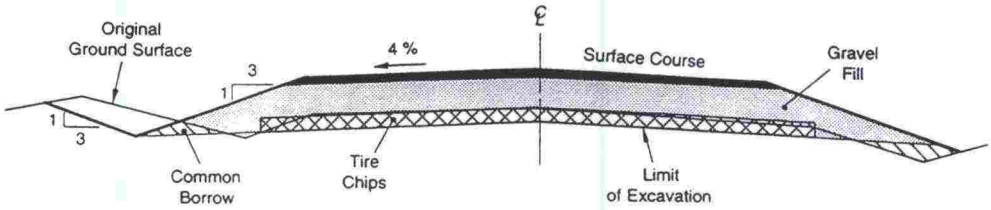

Kuva 4.17. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Koekohde. Rakeisuuskäyrät pintakerrokselle, karkealle täytteelle ja kaivumassalle /Eaton et al 1994/.*

Testikohde suunniteltiin 5 eri osa-alueeseen (A-E), joissa vaihdeltiin rengasrouhekerroksen ja päällysrakenteen paksuutta sekä kaivettavan maakerroksen paksuutta. Koeosuuksien lisäksi tieosuudella on 1 kontrolliosuus sekä 2 siirtymävyöhykettä. Pinnassa käytetty karkearakeisempi sorakerros oli 102 mm jokaisella koejaksolla. Lisäksi haluttiin tietoa siitä, tarvitaanko erityistä geotekstiiliä erottelemaan rengasrouhemateriaali hienoainespitoisesta pohjamaasta. Tämän vuoksi testijaksolla A käytettiin geotekstiiliä RR:n ympärillä. Kuvissa 4.18 ja 4.19 nähdään eri testijaksojen rakenteet pituusleikkauksen muodossa ja tyypillinen poikkileikkaus testijaksolta C.

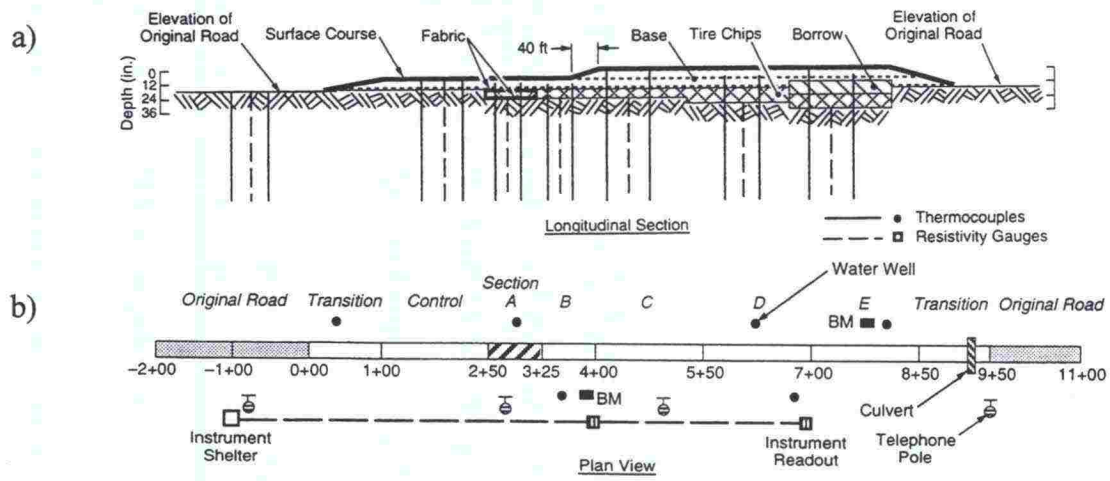
Kohde instrumentoitiin rakenteen lämpökäyttäytymisen, tien pinnan pysyvyyden ja pohjaveden laadun tarkkailemiseksi (kuva 4.20). Tarkempi kuvaus instrumentoinnista ja mittareista on kerrottu lähteissä /Eaton et al 1994/ ja /Humphrey and Eaton 1993/. Rakentamisen valmistuttua tien pinnan siirtymiä mitattiin dynaamisella kuormituslaitteistolla (HWD). Lisäksi mitattiin routanousun suuruutta ja tien pinnan laatua arvioitiin näköhavainnolla.




Kuva 4.18. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Koekohde. Suunnitelma ja pituusleikkaus koekohteen jakautumisesta eri testijaksoihin /Eaton et al 1994/.*

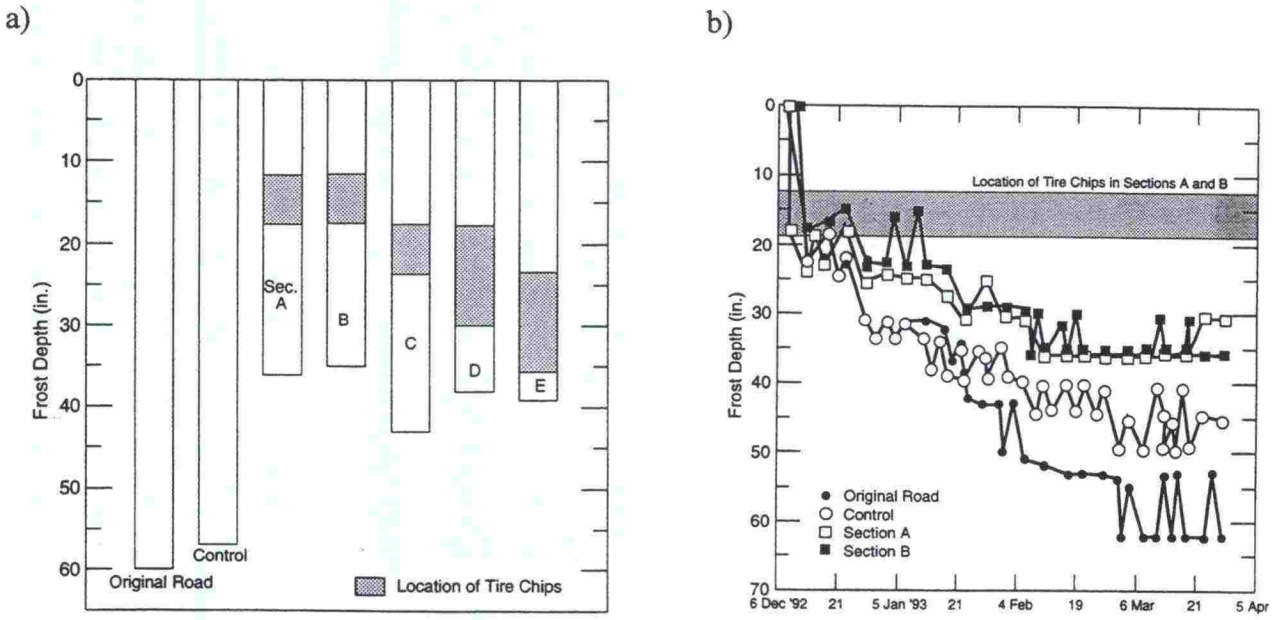



Kuva 4.19. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Koekohde. Tyypillinen tien poikkileikkaus testijaksolta C /Eaton et al 1994/.*



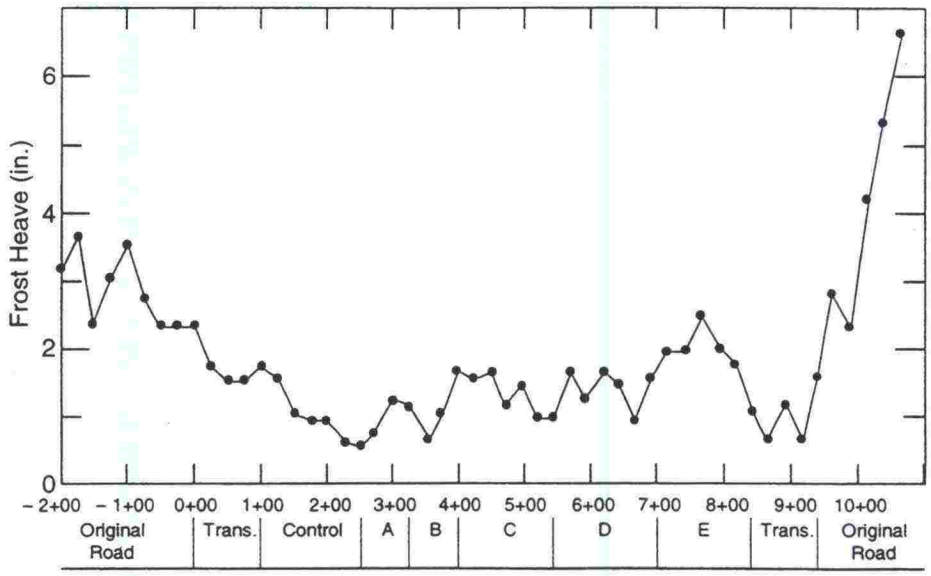

Kuva 4.20. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Koekohteen instrumentointi. a) Termoparien ja vastusmittareiden sijainti. b) Havaintokaivojen, pintamerkkien ja lukuinstrumenttien sijainti /Eaton et al 1994/.*

Kuvissa 4.21-4.23 on esitetty koekohteen havaintotuloksia ensimmäisen talven 1992-93 aikaisista mittauksista.Kuvassa 4.21a on esitetty maksimaalinen roudan tunkeutuminen eri tieosuuksilla talven 92-93 aikana. Kuvassa 4.21b puolestaan roudan tunkeutumista ajan kuluessa testiosuuksilla A ja B verrattuna kontrollivyöhykkeeseen ja alkuperäiseen tierakenteeseen. Kuvien perusteella voidaan heti päätellä rengasrouheen eristävän tierakennetta hyvin. Osuuksilla A ja B routa on tunkeutunut lähes yhtä syvälle, mikä oli odotettavissakin (d=152 mm). Paras eristys on ollut E-jaksolla, missä rengasrouheen ja päällysrakenteen paksuus oli suurin. Kuvasta 4.21b nähdään hyvin kuinka routa tunkeutui nopeasti noin 30 cm:n syvyydelle , jonka jälkeen testijaksoilla A ja B tunkeutuminen selvästi hidastui vertailuosuuksiin verrattuna.



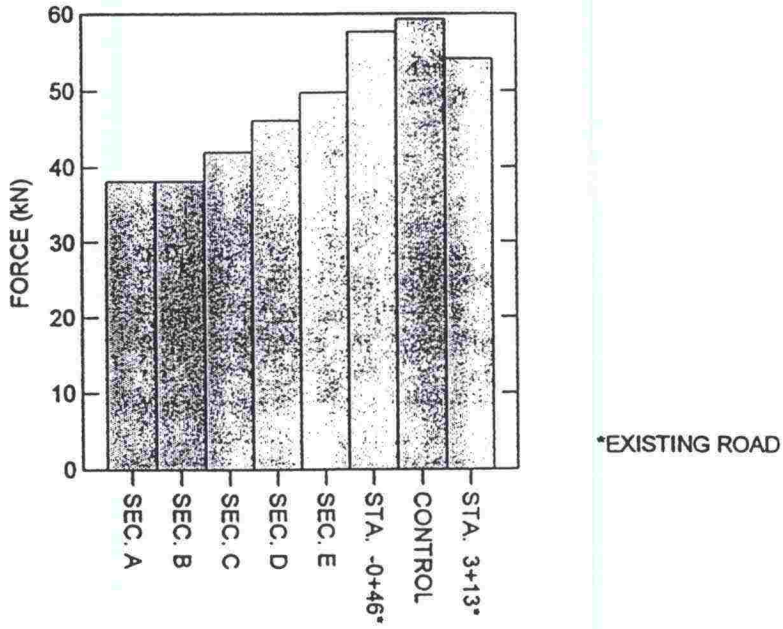

Kuva 4.21. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojauna. Koekohteen havaintotuloksia talvella 92-93. a) Roudan maksimaalinen tunkeutuminen eri testiosuuksilla b)Roudan tunkeutuminen ajan kuluessa, vertailu /Eaton et al 1994/.*

Kuvassa 4.22 on esitetty tien keskilinjan routanousun suuruus pituusleikkauksena. Mittaukset on tehty 24. helmikuuta 1993. Pohjavedenpinta alueella pysyi lähes samalla tasolla koko talven ajan siihen asti, kunnes sulaminen kunnolla alkoi (30.3.1993) ja nosti pohjaveden pintaa pahimmilla paikoilla lähes 1,2 metrillä. Pohjaveden laatua ei mitattu eikä arvioitu ensimmäisen talven aikana.




Kuva 4.22. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Koekohteen havaintotuloksia talvella 92-93. Routanousun suuruus tien keskilinjan alla /Eaton et al 1994/.*

Tienpinnan taipumia ja siirtymiä mitattiin talven aikana dynaamisella kuormituslaitteella (Dynatest Heavyweight Deflectometer, HWD), jonka kuormana testeissä oli 4100 kg. Kuvassa 4.23 on esitetty talven aikana tehdyt kokeet ja niiden aiheuttaman tienpinnan siirtymät. Kuvasta nähdään kuinka testijaksoilla siirtymät kokeissa ovat selvästi suurempia kuin alkuperäisellä tiellä ja kontrolliosuudella. Koeosuudella E siirtymät ovat pienempiä kuin muilla osuuksilla paksumman päällysrakenteen vuoksi. Maan jäätyminen havaitaan myös selvästi ajoittuvan joulukuun ja helmikuun välille, kun siirtymät kaikilla osuuksilla ovat pieniä.




Kuva 4.23. *Rengasrouheen hyödyntäminen routasuojana. Havaintotuloksia koekohteesta. Dynatest Heavyweight Deflectometer, HWD /Eaton et al 1994/.*

Havainnot routakoekohteesta ovat osoittaneen rengasrouheen olevan tehokas eriste. Lisätutkimuksia tarvitaan kuitenkin haluttaessa laajentaa käyttöä päällystettyihin tierakenteisiin Myös useamman talven kokemukset ja vaikutukset tulisi vielä havainnoida. Kohteen rakentamista ja sen aikaisia havaintoja on tarkemmin kuvattu luvussa 4.6.

## 4.7. Rakentaminen

Koekohteiden rakentaminen työteknisesti on sujunut hyvin. Rakentamisessa on käytetty seuraavia tavanomaisia työkoneita: kuorma-auto, traktori-kauhakuormaaja, puskutraktori, kauhakuormaaja sekä staattinen jyrä ja täryjyrä. Rengasrouheesta tehtävän rakenteen rakentaminen voidaan jakaa 9 eri työvaiheeseen:

1. Rakennuspohjan tasoitus ja mahdollinen kaivu
2. Geotekstiilin asennus
3. Rengasrouheen kuljetus rakennuspaikalle
4. Rengasrouheen levittäminen (kuva 4.24) ja tiivistys kerroksittain (kuva 4.25)
5. Geotekstiilin asennus
6. Maatäytteen ja päällysrakenteen rakentaminen
7. Luiskien muotoilu
8. Päällystystyö
9. Tien ylläpito ja tarkkailu (huolto)

Kuljetuksen aikana tapahtuu materiaalin tiivistymistä, mihin olisi varauduttava materiaalimäärää arvioitaessa. Rengasrouheen levittäminen ja tasoittaminen on onnistunut parhaiten puskutraktorilla tai traktori-kauhakuormaajalla. Tiivistäminen on tehty 0,3-0,9 metrin kerroksissa, mutta kuitenkin pienemmällä kerrospaksuudella saavutetaan parempi tiivistyminen ja työ on helpompi suorittaa. Tiivistystyössä koneena on käytetty staattista jyrää tai täryjyrää. Tärytiivistysmenetelmästä ei ole mainittavaa hyötyä tiivistymisen kannalta verrattuna tavanomaiseen tiivistysmenetelmään. Erään tutkimuksen mukaan tiivistymistä ei enää tapahdu noin 12-15 tiivistysajon jälkeen, kun kerrospaksuus on ollut noin metri /Newcomb and Drescher 1994/. Yleisenä havaintona rakentamisesta voidaan lisäksi mainita, että painavilla kuorma-autoilla oli vaikeuksia liikkua jo rakennetun RR-kerroksen päällä ja lisäksi piti noudattaa erityistä varovaisuutta mahdollisten rengasrouheesta ulostyöntyvien terästen osalta. Ison rouhekoon ('roiske') rakentamiseen meni lähes kaksinkertainen aika verrattuna pienempään rengasrouheeseen.

### 4.7.1. Kevennyskohde

Lounais-Oregonissa sijaitsevan koekohteen rakentaminen tapahtui aikaisemmin esitetyn kuvan 4.14 aikataulun mukaisesti kesäkuu-marraskuu 1990 väliselle ajalle. Kohteen päällystystyö suoritettiin kahdessa osassa (AB I: 15,2 cm + AB II: 5,1 cm) kuvan mukaisesti.

Rakennustyö aloitettiin pohjamaan tasoittamisella ja kivimurskasta tehtävän kuivatusjärjestelmän (french drain system) rakentamisella. Rengasrouhe ajettiin paikalle kuorma-autoilla (7,6 $m^3$) ja levitettiin 0,9 metrin kerroksissa (kokonaispaksuus n. 3,6 m). Tiivistystyö suoritettiin D-8 -puskutraktorilla (dozer) ajamalla vähintään 3 kertaa rakennetun kerroksen päältä. Rengasrouherakenteen luiskat viimeisteltiin traktori-kaivurilla. Geotekstiili asennettiin rengasrouheen ympärille erottamaan rouheen ja maa-aineksen sekoittuminen. Kankaassa jouduttiin käyttämään messinkisiä liittimiä (1,8 metrin välein), jotta geotekstiili pysyisi paikallaan ja ettei tekstiilin saumat ratkeaisi.

Maatäyte (d=0,9 m) RR-rakenteen päälle rakennettiin ja tiivistettiin 0,2 metrin kerroksissa ja kantava kerros rakennettiin kerralla. Molempien rakenteiden tiivistystyö suoritettiin Ingersoll-Rand LD 150 -koneella. Kohteen päällystystyön ensimmäisessä vaiheessa (Tammikuu -91) havaittiin heti halkeamia rengasrouheosuuden kohdalla. Tuolloin pahimman halkeamavyöhykkeen kohdalta päällysrakenne kaivettiin auki ja havaittiin, että maatäytteen paksuus päällysteen alla oli vain 0,5 m. Rakenne korjattiin ja lopullinen päällyste lisättiin (5,1 cm). Tämän em. vauriokohdan lisäksi ei tapahtunut muuta yllättävää ja rakentaminen yleisesti sujui hyvin. Rengasrouheella kevennetty tiepenger ja luiskat ovat pysyneet hyvin ja säilyttäneet muotonsa eikä vanha maanvieremä ole enää liikkunut. Vain painavat rekka-autot ovat aiheuttaneet pientä tärinää ajaessaan rengasrouheosuuden kohdalla.

### 4.7.2. Routasuojauskohde

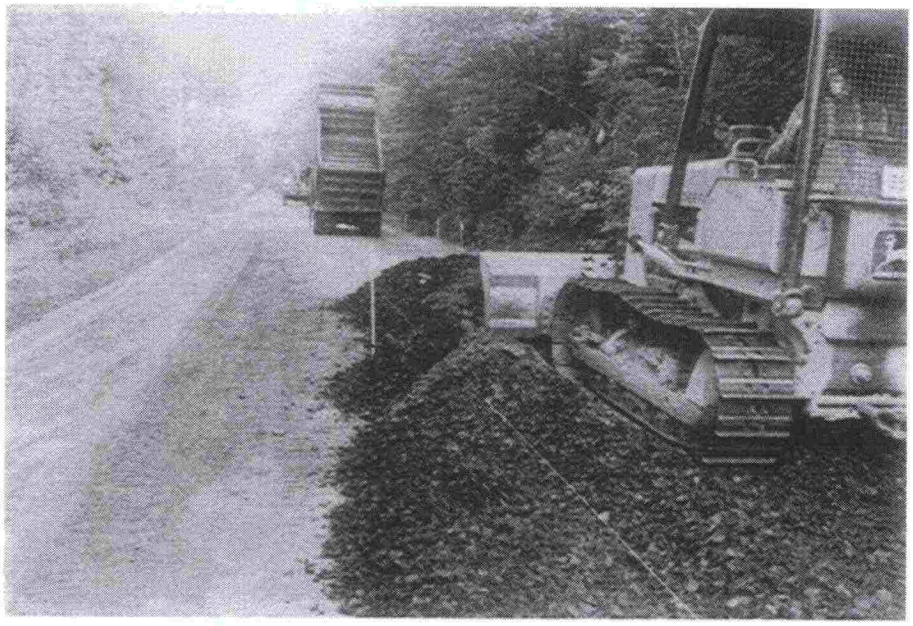
Sorapintaisen routakoekohteen rakentaminen ajoittui 24.8-2.9. 1992 väliselle ajalle, jolloin vallitsivat hyvät sääolosuhteet. Liikenne järjestettiin työn ajaksi kulkemaan toisella kaistalla. Autoilla ei olisi mahdollista ajaa rengasrouhe-kerroksen päällä, koska mahdolliset rengasrouheesta ulostyöntyvät teräkset saattaisivat puhkaista autonrenkaat.

Pohjamaan kaivu tehtiin hydraulisella kaivurilla ja osa massoista käytettiin rakennekerroksiin (testijakso E) ja loput massat kuljetettiin pois kuorma-autoilla. Rakennuspohja tasoitettiin puskutraktorilla (kuva 4.24) ja pohjan tiivistys ajamalla 4 kertaa 20 tonnia painavalla täryjyrällä (kuva 4.25) pohjamaan päältä. Rengasrouhe tuotiin paikalle kuorma-autolla ja levitettiin ja tasoitettiin haluttuun kerrospaksuuteen puskutraktorilla. Rakentamisen toleranssi oli ± 0,5 inc (noin 1,2 cm).

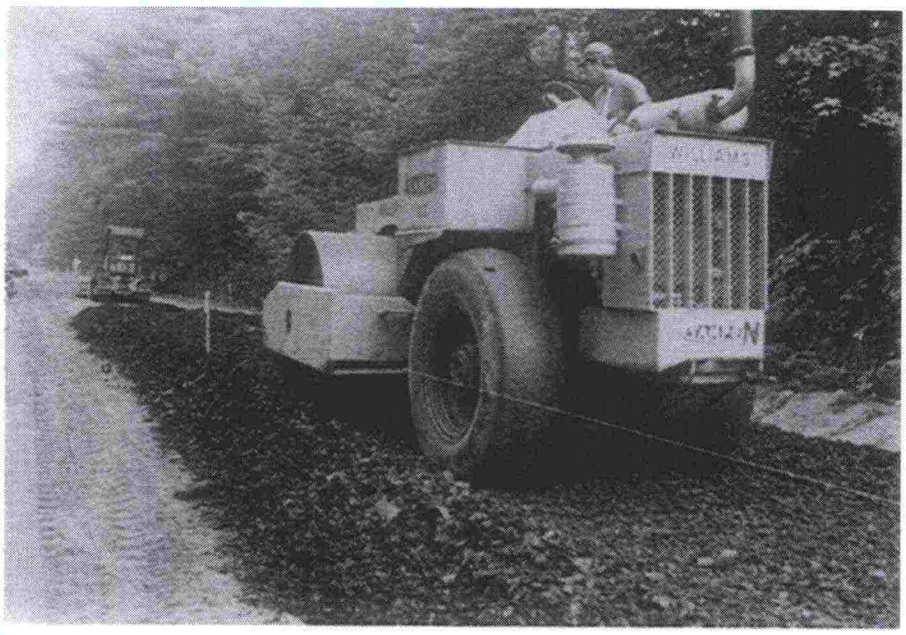
Tiivistäminen suoritettiin täryjyrällä 6 kertaa rengasrouhekerroksen päältä. Ensimmäinen tiivistysajo puristi 305 mm -paksuisen RR-kerroksen 10-25 mm, mikä merkitsee noin 3-8 % :n kokoonpuristumaa. Seuraavilla tiivistyskerroilla tiivistyminen oli niin pientä, ettei sitä voinut silmällä havaita. Tiivistyshavaintojen perusteella tuntui siltä, etteä tiivistystavan valinnalla ei ole suurta merkitystä tiivistymisen kannalta. Toinen ongelma tiivistämisen yhteydessä liittyi RR-kerroksen pursuilemiseen vaakasuunnasssa yli tarkoitetun alueen. Tähän rengasrouheen liikkumiseen sivusuunnassa saattaisi auttaa tiivistämisen yhteydessä yhtaikaa sivulla käytettävä kauhakuormaaja tai puskutraktori, joka tiivistäisi RR-kerrosta sivulta. Ongelma saattaisi myös poistua, jos voitaisiin työskennellä koko tien leveydellä.

Rengasrouhe-kerroksen päälle levitettiin lopuksi päällysrakenteen karkearakeinen täyte ja pintakerros. Kerrokset tiivistettiin täryjyrällä 4-6 kertaa.

Yleisesti testikohteen rakentaminen sujui hyvin. Ainoat ongelmat havaittiin heti rakentamisen jälkeen osuuksilla A ja B (rakennekerrokset olivat ohuimmat), joissa tienpinnassa oli 50-75 mm syviä uria rekka-kuormien johdosta.Kuitenkin ajan kuluessa oli havaittavissa enää hyvin pientä urautumista. Tämän perusteella voidaan olettaa näiden osuuksien lujittuneen rengasrouheen lisätiivistymisen ansiosta. Toinen syy lujittumiseen voi olla karkearakeisen täytteen vesipitoisuuden kohonneen lähemmäs optimivesipitoisuutta, jolloin liikenne aiheutti rakenteen tiivistymistä lisää. Koko talven ja kevään sulamiskauden kuluessa testialueiden ja kontrollialueen tienpinnan olivat hyvässä kunnossa verrattuna alkuperäisen tien pintaan, joka oli pahasti routinut ja melkein ajokelvoton.



Kuva 4.25. *Rengasrouheen hyödyntäminen tie- ja katurakenteissa. Routasuojauskohteen rakentaminen. Rengasrouheen levitystyö puskutraktorilla /Eaton et al 1994/.*



Kuva 4.26. *Rengasrouheen hyödyntäminen tie- ja katurakenteissa. Routasuojauskohteen rakentaminen. Rengasrouheen tiivistäminen täryjyrällä /Eaton et al 1994/.*

# 5. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

## 5.1. Ympäristötutkimukset Yhdysvalloissa

Yhdysvalloissa on nykyään jäterenkaista muodostunut jätehuollolle suuria haasteita suurien jäterengasmäärien takia ja niiden jatkuvasta hyödyntämiskeinojen etsimisestä. Kun renkaista valmistettavaa rengasrouhetta on alettu hyödyntämään maarakenteissa, on alettu pohtimaan materiaalin mahdollista ympäristöön aiheuttamaa haitallista vaikutusta. Materiaalilla saattaa olla vaikutusta pinta- ja pohjavesien laatuun. Näihin kysymyksiin vastaaminen antaa informaatiota päättäjille ja rakentajille materiaalin mahdollisesta soveltuvuudesta maarakennusmateriaaliksi.

Tulokset viidestä Yhdysvalloissa tehdystä tutkimuksesta esittävät /Zelibor 1991/, että renkaista liukenevat aineet eivät uhkaa ympäristöä. Laboratoriotutkimuksia on tehty seuraavien projektien osalta: kokonaisten renkaiden tai rengasrouheen käyttö maapenkereissä (DTC Laboratories 1990), jätelietteen sijoittaminen (Envirologic, Incorporated 1990), kaatopaikkarakenteet (J&L Testing Company 1989) ja rengaslammikot (Environmental Consulting Laboratory 1987). Näiden em. tutkimusten mukaan renkaista liukenevat aineet eivät aiheuta uhkaa pinta- ja pohjavesiin.

Myrkyllisyysominaisuuksien liukoisuustestit (TCLP=Toxicity Characteristics leaching procedure) on useiden kirjallisuuslähteiden mukaan käytetty arvioimaan jätteen haitallisuutta. Nämä testit edustavat pahimpia olosuhteita eli happosateiden kulkeutumista jätemateriaalin läpi aiheuttaen liukenemista. TCLP-testien tuloksia metallien liukenemisesta ja haihtuvista orgaaneista on esittänyt esimerkiksi /Zelibor 1991/. Näiden tuloksien perusteella rengasrouhe ei ole ympäristön kannalta haitallista jätettä.

Minnesotassa on myös tehty tutkimuksia (Twin City Testing Corporation 1990) rengasrouheen liukoisuusominaisuuksista laboratoriossa sekä kenttäkokeiden muodossa. Twin City Testing suoritti v. 1990 laajan laboratoriotutkimuksen, joilla saatiin tietoa rengasrouheesta sekä myös asfaltista liukenevista aineista eri olosuhteissa (taulukot 5.1 ja 5.2). Kokeissa käytettiin rengasrouhetta, joka oli valmistettu 'uusista' renkaista (5-10 v. vanhat renkaat) ja rengasrouhetta, joka oli tehty 'vanhoista' renkaista (15-20 v.). TCT:n ympäristötutkimuksen tavoitteena oli:

1. saada selville renkaista liukenevat ja voimakkaasti esille tulevat aineet sekä simuloida mahdollisesti pahimman tapauksen riskejä (worst case).
2. määritellä yhdisteet, jotka liukenevat renkaista äärimmäisissä olosuhteissa ja tunnistaa ne, joilla on mahdollisesti haitallista vaikutusta ympäristöön
3. kerätä maa- ja vesinäytteitä koekohteista. Mitata ja vertailla näistä näytteistä määritettyjen yhdisteiden konsentraatiota laboratoriossa tehtyihin liukoisuustesteihin verrattuna.
4. esittää rajoitettu biologinen kenttäkoe määrittelemään mahdollista renkaiden vaikutusta ekosysteemiin

Laboratorion liukoisuustestien ohjelma sisälsi 4 erilaista testityyppiä simuloimaan erilaisia pH-olosuhteita. Liukoisuustesteissä käytettiin USEPA SW-846 -menetelmää (EP Toxicity) näytteiden valmistamiseen. Liukoisuustestien koeolosuhteet olivat seuraavat:

#1 pH 3,5 (etikkahappo-liuos)
#2 pH 5,0 ( - " - )
#3 0,9 % NaCl-liuos (ei pH -vaatimusta)
#4 pH ≈ 8 (liuos $NH_3OH + NH_3$ asetaatti)

Kemialliset analyysit suoritettiin laboratoriossa liukenevien metallien (epäorgaaninen analyysi) ja hiilivetyjen (orgaaninen analyysi) osalta. Mahdollisia hiilivetyjä ovat aromaattiset ja suoraketjuiset öljyt. Taulukossa 5.1 on esitetty liukoisuustestituloksia metallien osalta. Yksikkö taulukossa on mg/rengas-kg. Taulukon alaosassa on pitoisuuksille eri menetelmillä määritettyjä rajoja. Yhdysvalloissa käytettyjä kriteerejä ovat:

- RAL (Recommended Allowable Limits) = sallittu pitoisuus juomavedelle
- Chronic Toxicity Criteria = sallittu pitoisuus pintavedelle
- Co-disposal Criteria = jätteen kaatopaikalle hyväksyminen
- EP Toxicity Criteria = testimenetelmä/kriteeri haitalliselle jätteelle
- TCLP Criteria = - " - - " - - " -

Taulukko 5.1. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. Kemiallisen analyysin tulokset metallien osalta /Twin City Testing 1990/.*

Table 6
Summary of Chemical Analysis - Metals
Waste Tire Project
4231-90-177

Minnesota Pollution Control Agency
February 19, 1990
Page 19

| Sample Number | Type | Ag | Al | As | Ba | Ca | Cd | Cr | Fe | Hg | Mg | Pb | S | Se | Sn | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 144656 | New #1 | ND | 2.25 | ND | 1.08 | 608.96 | 0.24 | 0.31 | 763.40 | ND | 7.79 | 0.92 | 5.38 | 0.23 | ND | 41.04 |
| 144659 | Old #1 | ND | 2.02 | ND | 0.44 | 23.57 | 0.27 | 0.51 | 1081.08 | ND | 2.85 | ND | 7.65 | 0.44 | ND | 50.81 |
| 144662 | Asphalt | ND | 79.38 | ND | 16.60 | 25101.96 | ND | 0.18 | 471.51 | ND | 10719.22 | ND | 136.36 | 2.37 | 26.68 | 3.05 |
| 145000 | New #2 | ND | 0.45 | 0.07 | 0.44 | 9.69 | 0.01 | ND | 87.55 | ND | 2.53 | ND | 5.95 | ND | 0.16 | 18.11 |
| 145005 | Old #2 | ND | 0.75 | ND | 0.13 | 11.24 | ND | ND | 49.52 | ND | 1.74 | ND | 9.33 | ND | 0.07 | 37.20 |
| 145008 | Asphalt | ND | 3.78 | ND | 6.88 | 12100.00 | ND | ND | 31.80 | ND | 3540.00 | ND | 72.40 | ND | 0.30 | 1.26 |
| 145010 | New #3 | ND | ND | ND | 0.19 | 7.80 | ND | ND | 0.32 | ND | 1.15 | ND | 6.52 | ND | 0.46 | 3.30 |
| 145013 | Old #3 | ND | 0.14 | ND | 0.70 | 7.28 | ND | ND | 2.12 | ND | 1.18 | ND | 7.96 | ND | 0.13 | 13.52 |
| 145015 | Asphalt | ND | ND | ND | 0.76 | 250.00 | ND | ND | 0.40 | ND | 37.40 | ND | 11.20 | ND | 0.56 | 0.48 |
| 145020 | New #4 | ND | ND | ND | 1.06 | 6.85 | ND | ND | 0.10 | ND | 0.81 | ND | 6.52 | ND | ND | ND |
| 145021 | Old #4 | ND | ND | ND | 0.43 | 9.62 | ND | ND | 2.87 | ND | 1.15 | ND | 10.84 | ND | ND | ND |
| 145024 | Asphalt | ND | ND | ND | 7.88 | 1846.00 | ND | ND | 0.32 | ND | 142.18 | ND | 16.80 | ND | ND | ND |
| 159099 | PC-W-tire | <0.01 | 1.8 | <0.1 | <0.01 | 14.4 | <.003 | <.01 | 4.4 | <.001 | 2.8 | <.02 | 633 | <0.1 | <.05 | <.01 |
| 159114 | FL-W-tire | <0.01 | 180 | <0.1 | 1.93 | 1080 | 0.032 | 0.35 | 298 | <.001 | 383 | 0.23 | 737 | <0.1 | 0.57 | 0.87 |
| 159121 | FL-W-back | <0.01 | 4.3 | <0.1 | 0.04 | 36.6 | <.003 | <.01 | 5.8 | 0.001 | 6.2 | <0.02 | 566 | <0.1 | <.05 | <.01 |
| 159117 | FL-S-tire | <0.01 | 1170 | 4 | 45 | 10700 | <0.2 | 1.5 | 2240 | <0.04 | 1060 | <1.0 | 1530 | 0.4 | 5.5 | 41 |
| 159108 | FL-S-back | <0.01 | 4680 | <2 | 34 | 4930 | <0.2 | 8.3 | 7160 | 0.04 | 1530 | <1.0 | 370 | <1 | <2.5 | 20 |
| 159071 | PC-S-tire | <0.01 | 3300 | <1 | 66 | 6040 | <0.2 | 5.4 | 4690 | <0.04 | 1180 | 43 | 1480 | 0.6 | 60 | 123 |
| 161251 | Tire grab1 | <0.5 | 3490 | <5 | 23 | 659 | <0.2 | 4.9 | 5220 | <0.26 | 630 | 6.9 | 84 | <5 | <2.5 | 170 |
| 161254 | Tire grab2 | <0.5 | 3310 | <5 | 16 | 759 | <0.6 | 6 | 11000 | <0.26 | 660 | 31 | 150 | <5 | <2.5 | 227 |
| 159099 | Field pH | 6.1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 159114 | Field pH | 6.9 | | | | | | | | | | | | | | |
| 159121 | Field pH | 6.6 | | | | | | | | | | | | | | |
| RAL | | | | 0.050 | 1.500 | | 0.005 | 0.120 | 0.300 | 0.001 | | 0.020 | | 0.045 | | 5.000 |
| Chronic | | 0.050 | 0.147 | 0.030 | 1.000 | | 0.001 | 0.010 | 0.300 | 0.001 | | | | | | 5.000 |
| Co-disposal | | 0.500 | | 0.100 | 10.000 | | 0.100 | 0.500 | 3.000 | 0.020 | 0.500 | 0.500 | | 0.100 | | 50.000 |
| EP Toxicity | | 5.000 | | 5.000 | 100.000 | | 1.000 | 5.000 | | 0.200 | | 5.000 | | 1.000 | | |
| TCLP | | 5.000 | | 5.000 | 100.000 | | 1.000 | 5.000 | | 0.200 | | 5.000 | | 1.000 | | |

For samples 144656-145024 the results were expressed as mg/kg (milligrams per kilogram) of of tire sample ("normalized")
For samples 159099-161254 the results were expressed as mg/kg of soil or mg/l (milligrams per liter) of water as receivec
Mg/kg and mg/l are equivalent to parts per million.
The equivalent concentrations in the estimated porewater volume are 0.8 times the leachate values reported (see page 31).

Condition #1 = pH 3.5 leach
Condition #2 = pH 5.0 leach
Condition #3 = 0.9% NaCl leach
Condition #4 = pH 8.0 leach

FL = Floodwood Road Site
PC = Pine County Road Site
S = soil sample
W = water sample
Tire grab = soil sample under stockpile

twin city testing corporation

Tuloksia orgaanisista analyyseistä on esitetty taulukossa 5.2. Kokeissa suurimmat pitoisuudet saavutettiin testiolosuhteissa #4. Hiilivetyjen analyysit on suoritettu spektrometrillä, massaspektrometrillä tai kromatografilla. Taulukoissa 5.1 ja 5.2 on testituloksia myös kenttäkokeissa otetuista näytteistä. Maa- ja vesinäytteitä otettiin laboratoriokokeita varten kahdesta koekohteesta. Toinen oli kääntöpaikka-alue Floodwoodissa, jonka rakenteeseen oli käytetty rengasrouhetta. Toinen kohde oli Royalton Township -niminen tie lähellä Grasstonia. Molemmissa kohteissa maanäytteitä otettiin RR-rakenteen alapuolelta sekä rakenteen läheisyydestä. Pohjavesinäytteitä otettiin myös koerakenteen läheisyydestä tutkimuksia varten. Taulukoissa 5.1 ja 5.2 on esitetty näiden näytteiden tutkimustuloksia.

Taulukko 5.2. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. Kemiallisen analyysin tulokset hiilivetyjen osalta /Twin City Testing 1990/.*

Table 7

Minnesota Pollution Control Agency
February 19, 1990
Page 22

Summary of Chemical Analysis
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons
and Total Petroleum Hydrocarbons
Waste Tire Project
4231-90-177

| Sample Number | Type | Total Petroleum Hydrocarbons 418.1 mg/l | Total Petroleum Hydrocarbons Normalized 418.1 mg/kg | PAH (carcinogenic) Sum of List 1 ng/l | PAH (carcinogenic) Normalized Sum of List 1 ng/kg | PAH (non-carcinogenic) Sum of List 2 ng/kg | PAH (non-carcinogenic) Normalized Sum of List 2 ng/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 144656 | New #1 | ND | ND | ND | ND | 430 | 949 |
| 144659 | Old #1 | ND | ND | 230 | 497 | 130 | 281 |
| 144662 | Asphalt | 2.70 | 0.06 | ND | ND | 153 | 3460 |
| 145000 | New #2 | ND | ND | 200 | 425 | 498 | 1058 |
| 145005 | Old #2 | ND | ND | 88 | 187 | 248 | 527 |
| 145008 | Asphalt | ND | ND | ND | ND | 340 | 6800 |
| 145010 | New #3 | ND | ND | 339 | 1354 | 479 | 1916 |
| 145013 | Old #3 | ND | ND | 100 | 400 | 171 | 684 |
| 145015 | Asphalt | 17.50 | 0.35 | 36 | 728 | 436 | 8716 |
| 145020 | New #4 | 35.50 | 0.14 | 790 | 3159 | 1271 | 5083 |
| 145021 | Old #4 | 31.50 | 0.13 | 239 | 954 | 605 | 2421 |
| 145024 | Asphalt | 25.40 | 0.51 | 6 | 118 | 317 | 6330 |
| 159099 | PC-W-tire | 0.5 | | 44 | | 2257 | |
| 159114 | FL-W-tire | <0.5 | | 7 | | 12 | |
| 159121 | FL-W-back | 11.8 | | 3 | | 114 | |
| 159117 | FL-S-tire | NR | | <550 ppb | | <550 ppb | |
| 159108 | FL-S-back | NR | | <550 ppb | | <550 ppb | |
| 159071 | PC-S-tire | NR | | <550 ppb | | <550 ppb | |
| 161251 | Tire grab1 | 17.6 | | <410 ppb | | <410 ppb | |
| 161254 | Tire grab2 | 55.5 | | <430 ppb | | <430 ppb | |
| 159099 | Field pH | 6.1 | | | | | |
| 159114 | Field pH | 6.9 | | | | | |
| 159121 | Field pH | 6.6 | | | | | |
| Detection Limit | | 0.5 mg/l | | 4-20 ppt | | 4-20 ppt | |
| RAL | | | | 28 | | 280 | |
| Chronic | | | | 21 | | 280 | |

All PAH concentrations expressed as ng/l (nanograms per liter) or
ng/kg (nanograms per kilogram) which is equivalent to parts per trillion
For samples 144656-145024, the concentrations are expressed in ng/kg (nanograms per kilogram) of tire material.
The equivalent concentrations in the estimated porewater volume are 0.8 times the values reported (see page 31).

Condition #1 = pH 3.5 leach
Condition #2 = pH 5.0 leach
Condition #3 = 0.9% NaCl leach
Condition #4 = pH 8.0 leach

FL = Floodwood Road Site
PC = Pine County Road site
S = soil sample
W = water sample
Tire grab = soil sample under stockpile

twin city testing corporation

Rengasrouheen liukoisuutta koskevia johtopäätöksiä Twin City Testingin suorittamista testeistä olivat:

1. Metalleja liukenee rengasrouheesta eniten happamamissa olosuhteissa. Laboratoriotesteissä ilmenneitä huomioitavia metalleja olivat: barium (Ba), cadmium (Cd), Kromi (Kr), lyijy (Pb), seleeni (Se) ja sinkki (Zn).

2. Aromaattisia ja suoraketjuisia öljyjä liukenee eniten olosuhteissa, kun pH on noin 8

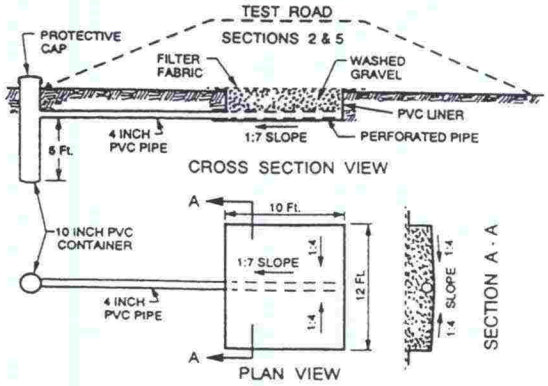
3. Sallitut pitoisuudet juomavedelle saavutetaan vain pahimmissa olosuhteissa. Näitä huomioon otettavia ja testeissä näkyviä aineita ovat: barium, cadmium, kromi, lyijy, seleeni, sinkki sekä listat 1, 2 koskien hiilivetyjä (kts. taulukko 5.2.)

4. Co-disposal ja Ep-toxicity -kriteerejä ei rengasrouheen liukoisuudella yleensä saavuteta.

5. Kenttäkokeet ja biologinen tutkimus ei tunnistanut merkittävää eroa rengasrouhe-alueen ja kontrollialueen välillä koskien tutkittuva maanäytteitä. Toisen koe-kohteen (Floodwood) vesinäytteissä havaittiin pitoisuuksien kohoamista juomavesikriteeriin verrattaessa.

Tutkimustulosten perusteella on Minnesota asettanut suosituksia rengasrouheen käytölle maarakenteissa. Toinen suositus on rengasrouheen sijoittaminen pohjaveden yläpuolelle ja mielellään kuiviin olosuhteisiin. Tällöin pitäisi suunnittelussa myös huomioida penkereen tehokas kuivatus ojilla ja pinnan kaltevuuksilla. Myöskin suositeltiin lisää kenttätutkimuksia rengasrouheen käytöstä tierakenteissa. Kokeiden yhteydessä tulisi asentaa riittävästi havaintokaivoja rengasrouherakenteeseen sekä ympäröivälle alueelle, jotta voidaan suorittaa vertailua näytteiden kesken. Suositeltavaa olisi myös RR-rakenteen käyttö neutraaleissa olosuhteissa (pH noin 7) hiilivetyjen liukenemisen vuoksi.

Wisconsinissa /Edil and Bosscher 1992/ on koekohteen yhteyteen rakennettu mittauslaite, jolla voidaan kerätä rengasrouhekerroksen läpi virranneet pintavedet (kuva 5.1). Mittauslaite on asennettu kohteen kahdelle testijaksolle, joiden rakenteessa on käytetty pelkkää rengasrouhetta. Rengasrouhekerroksen paksuus on molemmissa kohdissa 1,5 m ja päällysrakenne on vain 0,3 m paksu. Testikohteessa RR-rakenne on toiminut pengertäytteenä. Taulukossa 5.3 on kohteessa otetuista näytteistä tehtyjen liukoisuustestien tuloksia.




Kuva 5.1. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. Vesinäytteen keräyslaite (lysimetri) rengasrouhetestikohteessa /Eldin and Senouci 1992/.*

Taulukko 5.3. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. Liukoisuustestien tuloksia Wisconsinin koekohteesta /Eldin and Senouci 1992/.*

| Element tested (1) | Unit (2) | Lysimeters in Section 2 | | | | | | Lysimeters in Section 5 | | | | | | Wisconsin limits[a] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | April (3) | May (4) | June (5) | July (6) | August (7) | September (8) | April (9) | May (10) | June (11) | July (12) | August (13) | September (14) | |
| Barium | µg/L | 240 | 240 | 230 | 210 | 360 | 472 | 220 | 210 | 240 | 190 | 270 | 300 | 1,000/20 |
| Calcium | mg/L | 190 | 180 | 160 | 140 | 120 | 114 | 200 | 170 | 180 | 110 | 130 | 143 | /25 |
| Iron | mg/L | 0.05 | 0.05 | 0.24 | 0.57 | 0.26 | 0.39 | 1.3 | 0.05 | 0.12 | 0.54 | 0.53 | 0.36 | /0 |
| Lead | µg/L | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 5 | 4 | 15 | 6 | 50/5 |
| Magnesium | mg/L | 190 | 160 | 150 | 130 | 120 | 132 | 200 | 150 | 150 | 96 | 110 | 121 | /25 |
| Manganese | µg/L | 170 | 200 | 220 | 350 | 2,500 | 2,060 | 230 | 270 | 300 | 200 | 1,700 | 2,310 | /50 |
| Sodium | mg/L | 330 | 290 | 220 | 130 | 86 | 89 | 280 | 220 | 260 | 98 | 120 | 137 | /10 |
| Zinc | µg/L | 19 | 12 | 17 | 16 | 12 | — | 84 | 46 | 44 | 540 | 560 | 119 | 5,000/25 |
| Chloride | mg/L | — | 770 | 570 | 300 | 230 | 120 | — | 460 | 300 | 130 | 170 | 200 | /25 |
| Sulfate | mg/L | 130 | 97 | 130 | 150 | 140 | 110 | — | 140 | 140 | 92 | 150 | 180 | /25 |
| pH | su | 7.6 | 7.5 | 7.6 | 7.9 | 7.3 | 7.5 | — | 7.7 | 7.4 | 7.8 | 7.5 | 7.3 | — |
| Alkalinity | mg/L | 381 | 557 | 656 | 722 | 710 | 726 | — | 533 | 567 | 625 | 671 | 705 | /10 |
| Hardness | mg/L | 1,300 | 1,100 | 1,000 | 900 | 794 | 828 | 1,300 | 1,100 | 1,100 | 660 | 777 | 855 | — |
| BOD | mg/L | 41 | 15 | 6 | 5.2 | 17 | 40 | — | 14 | 10 | 39 | 75 | 57 | /25 |
| COD | mg/L | 200 | 110 | 84 | 120 | 140 | 230 | 280 | 170 | 220 | 320 | 290 | 390 | /25 |

[a]Limits are taken from Wisconsin Administrative Code, October 1990, Chapter NR 140, 682–686. The figures represent hazardous/preventive limits.

## 5.2. Uusiomateriaalien ympäristökelpoisuustestit Suomessa

Auton renkaista valmistettavaa rengasrouhetta voidaan pitää ympäristörasitusten kannalta uusiomateriaalina, jota voidaan hyödyntää erilaisiin maarakenteisiin. Tässä tapauksessa uusiomateriaalista valmistettuja marakenteita voidaan kutsua uusiorakenteiksi. Suomessa on käynnistetty vuoden 1994 lopulla viisivuotinen kansallinen ympäristögeotekniikka -ohjelma, johon sisältyy osana projekti: "Uusiotuotteiden käyttö tie- ja katurakenteissa". Ohjelman yhtenä tavoitteena on selvittää ja tutkia Suomessa syntyvien erilaisten nykyisin jätteiksi luettavien maarakennuspotentiaalia ja käyttökelpoisuutta uusiomateriaaleina ja -tuotteina maarakentamisessa. Tavoitteena on edelleen kehittää materiaaleista tekniset, taloudelliset ja ympäristölliset vaatimukset täyttävät tuotteet korvaamaan hyvien, mutta ehtyvien luonnonmateriaalien lähinnä soran ja hiekan käyttöä maarakentamisessa /Tammirinne et al 1995/.

Jotta uusiomateriaalien käyttö uusiotuotteina erilaisissa maarakenteissa on käytännössä mahdollista, tulee näiden materiaalien teknisten ja taloudellisten näkökohtien lisäksi täyttää materiaalille asetettavat ympäristölliset vaatimukset. Uusiomateriaalit on tutkittava enen niiden yleisempää käyttöönottoa yleensä tavanomaisten maarakennusmateriaalien hyväksymis- ja käyttöönottomenettelyä soveltaen sekä lisäksi ympäristökäyttäytymisen ja ympäristövaikutusten kannalta. Uusiomateriaalien käyttörajoitukset ja käytön esteet tällä hetkellä kohdistuvat ensisijaisesti ympäristökuormitukseen, joten rengasrouheen tärkeimpänä käyttökelpoisuuden arviointikriteerinä voidaan pitää materiaalin mahdollista haittattomuutta maaperään ja pohjaveteen /Tammirinne et al 1995/.

Suomessa rengasrouheelle tehtävät ympäristökelpoisuustutkimukset rajoittuvat laboratoriossa suoritettaviin vesiliukoisuustesteihin ja koekohteissa tehtyihin pohjaveden laadun mittauksiin. Tähän mennessä uusiotuotteiden ympäristökelpoisuutta arvioitaessa on Suomessa käytetty lähinnä ulkomailla käytössä olevia kelpoisuuskriteerejä, koska omia kriteerejä ja arviointimenetelmiä vasta kehitellään VTT:n Kemiantekniikan yksikössä. Liukoisuustestimenetelmät ovat kehittyneet erityisesti viimeisten 5 vuoden aikana. Suurin osa kehitys- ja tytkimustyöstä on tehty Hollannissa, jossa on kehitetty maarakennusmateriaaleille laajalti käytetyt kolonni- ja diffuusiotestit. Taulukossa 5.4. on esitetty VTT:llä yleisimmin käytetyt standardoidut liukoisuustestit.

Taulukko 5.4. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. VTT:llä yleisimmin käytetyt standardoidut liukoisuustestit /Tammirinne et al 1995/.*

| Testi | Testistä saatu tieto |
|---|---|
| Kolonnitesti (esim. hollantilainen NEN 7343, pohjoismainen Nordtest-testi). Soveltuu jauhetulle / rakeiselle materiaalille. | Kolonnitestin tulosten perusteella voidaan arvioida materiaalista liukenevien aineiden määrä ja sijoituspaikalla muodostuvan suotoveden laatua eri ajanjaksoina. |
| Diffuusiotesti (esim. hollantilainen NEN 7345) Soveltuu monoliittiselle ja jähmeälle materiaalille (kappaleelle) | Testi antaa tietoja:<br>- eri aineiden liukoisuusmekanismista (esim. diffuusion kautta tapahtuvasta liukenemisesta)<br>- liukenevien aineiden määrästä tiettynä ajanjaksona esim. pinta-alaa kohden<br>- eri aineiden kemiallisesta ja fysikaalisesta sitoutumisesta |
| Maksimiliukoisuustesti (hollantilainen NEN 7341) Soveltuu jauhetulle / rakeiselle materiaalille | Testi antaa tietoja eri aineiden maksimiliukoisuudesta geologisessa aika-skaalassa tapauksessa, jossa materiaalin rakenne on täysin hajonnut (testissä käytetään jauhettua näytettä, raekoko < 125 mm). |
| Laadunvarmistustesti jauhetuille / rakeiselle materiaalille (CEN-testi) | Testi antaa mitan eri aineiden liukoisuudesta. Testiä 3) voidaan myös pitää kolonnitestin pikatestinä. |
| Laadunvarmistustesti: EPA/ TCLP Tehdään jauhetulle materiaalille | Testiä käytetään jätteen laadun (ongelmajäte - ei ongelmajäte) arvioinnissa. Se antaa mitan eri aineiden maksimiliukoisuudessa. |

Kolonnitesti ja diffusiotesti antavat tietoa eri aineiden liukenemisesta lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä sijoituspaikassa, jossa ainoastaan jätteen ominaisuudet määräävät aineiden liukoisuuden. Liukoisuus pitkällä aikavälillä voidaan selvittää ravistelu- tai maksimiliukoisuustestillä. Kaikki kehitetyt testit soveltuvat vain epäorgaanisten aineiden liukenemisominaisuuksien tutkimiseen.

Taulukossa 5.4 esitettyjä testimenetelmiä voidaan pitää perustesteinä. Yleensä vain yhdellä testillä ei voi karakterisoida materiaalin ominaisuuksia. Eri aineiden liukeneminen jätemateriaaleista riippuu useiden ilmiöiden ja olosuhteiden yhteisvaikutuksesta. Sijoituspaikan olosuhteita ja erityispiirteitä huomioivat testit ovat vasta kehitteillä.

Sovellettaessa testimenetelmiä tierakenteissa hyödynnettävillä uusiomateriaaleilla on erityisesti otettava huomioon seuraavat seikat:
- tierakenteissa yleensä vallitsevat kyllästämättömät, mutta usein märät olosuhteet
- ympäröivän materiaalin vaikutus (pH/redox-olosuhteet)
- anaerobisten olosuhteiden vaikutus
- lämpötilan vaihtelu ja vaikutus

Yksi keino materiaalin ympäristötestien tulosten arviointiin on esimerkiksi Hollannissa kehitetyn sijoituspaikkakriteerin ohjearvot (taulukko 5.5). Taulukossa esiintyvien sijoituskriteerien määritelmät ovat seuraavat:

Ryhmä 1A- Sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen.

Ryhmä 1B- Sijoitus ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen.

Ryhmä 2- Sijoitus eristettynä.

Taulukko 5.5. *Rengasrouheen ympäristövaikutukset. Hollantilaisen diffuusiotestin ohjearvoehdotukset (mg/m² /64 d) kiinteille maanrakennusmateriaaleille esimerkkitapauksessa, josssa materiaalin paksuus sijoituskohteessa on 0,3 m ja tarkasteltavien aineiden diffuusiokertoimet < 10 $^{-11}$ m²/s /Mäkelä et al 1995/.*

| | Kiinteä rakennusmateriaali (V > 50 cm³) | | |
|---|---|---|---|
| | Ryhmä 1 A | Ryhmä 1 B | Ryhmä 2 (vanhat ohjearvot) |
| As | 41 | 140 | 300 |
| Ba | 600 | 2 000 | 4 500 |
| Cd | 1,1 | 3,8 | 7,5 |
| Co | 29 | 95 | 200 |
| Cr | 140 | 480 | 950 |
| Cu | 51 | 170 | 350 |
| Hg | 0,4 | 1,4 | 3,5 |
| Mo | 14 | 48 | 95 |
| Ni | 50 | 170 | 350 |
| Pb | 120 | 400 | 800 |
| Sb | 3,7 | 12 | 25 |
| Se | 1,4 | 4,8 | 9,5 |
| Sn | 29 | 95 | 200 |
| V | 230 | 760 | 1 500 |
| Zn | 200 | 670 | 1 500 |
| Br | 29 | 95 | 200 |
| Cl | 18 000 | 54 000 | 150 000 |
| CN-kompleksi | 7,1 | 24 | 50 |
| CN-vapaa | 1,4 | 4,8 | 9,5 |
| F | 1 300 | 4 400 | 9 500 |
| $SO_4$ | 27 000 | 80 000 | 200 000 |

### 5.2.1. Rengasrouheen ennakkotutkimukset laboratoriossa

Tutkimuksia rengasrouheen pitkäaikaista vaikutuksista ympäristöön on vielä hyvin rajoitetusti. Pitkäaikaisia vaikutuksia voidaan laboratoriossa tutkia yleensä ns. maksimiliukoisuustestillä tai ravistelutesteillä. Maksimiliukoisuustestillä määritetään materiaalista liukeneva haitallisten aineiden määrä pitkällä aikavälillä, kun jätteen neutralointikapasiteetti on käytetty loppuun tai jäte on menettänyt rakenteensa.

Ilola-Sannäsiin (pt 11863) rakennettavaa koekohdetta varten on rengasrouheelle RR2 suunniteltu tehtäväksi ennakkoon liukoisuustesti VTT:n Kemiantekniikan laboratoriossa. Testi tehdään vesiravistelutestinä, jossa näyte koostuu 1 cm kokoisista kumipaloista ja teräslankapaloista. Testin ravisteluajat ovat 1 viikko ja 1 kuukausi. Testi on suhteelisen raju sijoituskohteeseen nähden, jossa kumiin kohdistuva vesivirtaus ja rasitus on mahdollisesti melko pientä. Ravistelukokeen tulokset antavat kuitenkin jonkinlaista kuvaa tuotteen pitkän ajan kestävyyden ennakoinnista. Ennakkotestin tarkoituksena on kuitenkin vain saada selville se ainesryhmä, jonka pitoisuus mahdollisesti lähtee kasvuun. Ennakkoon mahdollisesti määritettävät aineosat ovat:

- rikki sulfaattina
- kupari Cu
- sinkki, Zn
- Kromi, Kr
- aromaattiset sekä suoraketjuiset öljyt (hiilivedyt)

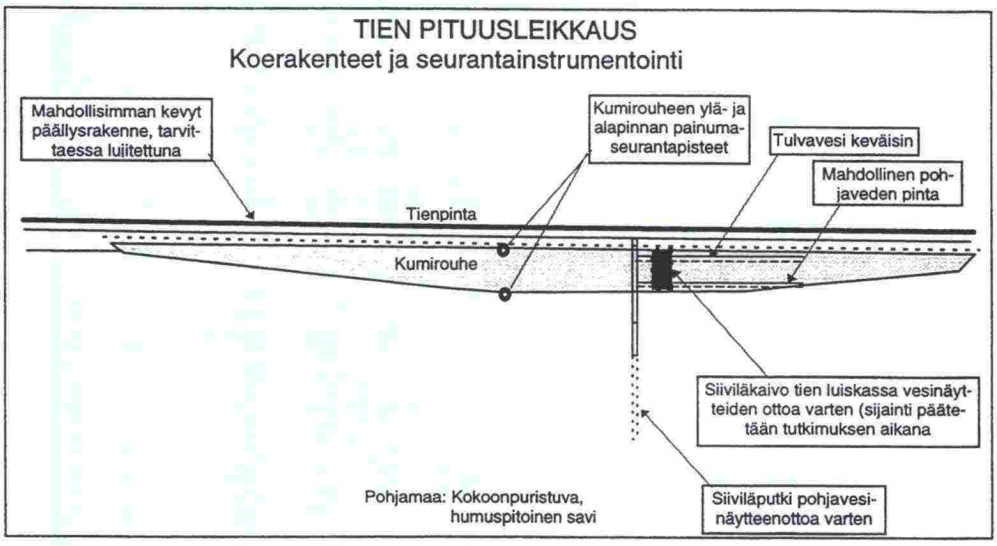
Ennakkokokeiden ja koekohteen vesinäytteiden testauksen perusteella on järkevää sopia mahdollisesti jatkotutkimuksista kokeissa voimallisesti esiintyneiden aineiden osalta tai tutkimatta jääneiden aineiden osalta, jotka mahd. myöhemmin osoittautuvat seurantaa vaativiksi.

### 5.2.2. Koerakennetutkimus

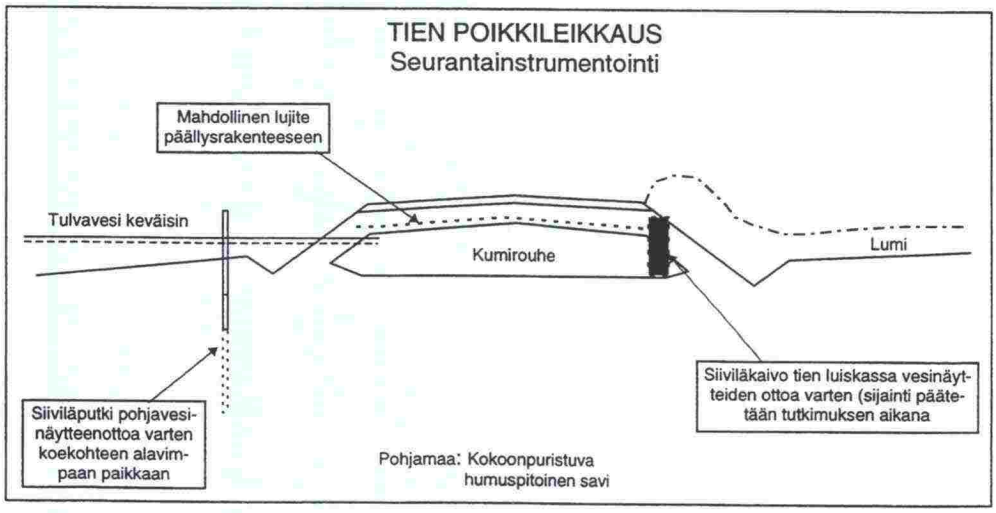
Rengasrouhe on rakennusmateriaalina uusi ja sen mahdollisia ympäristövaikutuksia ei tunneta vielä riittävästi. Jotta materiaalista kehittyisi maarakentamisessa yleisesti käytettävä tuote, on sen ympäristöön aiheuttamat vaikutukset tutkittava laboratorion liukoisuustestien lisäksi koekohteessa. Ympäristörasituksia voidaan koerakenteilla mitata rakennetusta rengasrouherakenteesta, mahdollisesti ympäröivistä rakenteista ja maamateriaaleista sekä pohjavedestä.

Kesällä -97 toteutettavan rengasrouheella kevennettävän koekohteen instrumentointi ympäristövaikutusten arvioimiseksi on suunnitteilla. Kohteeseen asennetaan mahdollisesti erityisiä kaivoja, joista voidaan ottaa vesinäytteitä laboratoriotutkimuksia varten. Kuvassa 5.2 on esitetty koekohteen alustava pituusleikkaus ja poikkileikkaus, joista näkyvät kevennysmateriaalin sijainti sekä alustavasti suunniteltu instrumentointi. Ympäristönäytteitä koekohteesta otetaan sunnitelman mukaisesti syksyllä 1997, keväällä ja syksyllä 1998. Kohteen tuloksia voidaan verrata Yhdysvalloissa tehtyihin ympäristötutkimuksiin.

a)




b)




Kuva 5.2. *Rengasrouhekevennys Ilola-Sannäs koekohteessa, a) kaaviokuva tien pituusleikkauksesta ja instrumentoinnista b) kaaviokuva tien poikkileikkauksesta ja instrumentoinnista.*

## 6. KUSTANNUSVERTAILU

Uudenmaan tiepiiri rakentaa rengasrouheesta (RR2) kesän 1997 aikana noin 350 metrin pituisen kevennyskoerakenteen. Koekohde sijaitsee paikallistiellä 11863 välillä Ilola-Sannäs, jossa keväisin korkealle nouseva tulvavesi on aiheuttanut vaurioita nykyiseen tierakenteeseen. Suunnitelmassa tien tasausta nostetaan yhteensä 0,7 m (nyk. tsv +1,8m -> suunniteltu tsv + 2,5 m). Kevennysmitoituksessa (painumat, vakavuus, päällysrakenne) rengasrouheelle on käytetty parametreistä tilavuuspainoa $\gamma$= 7 kN/m$^3$ ja kitkakulmaa $\phi$= 25 °. Rengasrouhekerroksen paksuus vaihtelee 0,4-1,3 metrin välillä (periaate kuvassa 5.2). Päällysrakenteen paksuudeksi on alustavasti arvioitu 1,1 m ja se muodostuu seuraavasti:

- AB 50 mm
- Kantava kerros 250 mm
- Jakava kerros 800 mm

Taulukossa 6.1 on esitetty koekohteen rakentamisen kustannuslaskelma ja vertailu kevytsoralla toteutettuun vaihtoehtoon. Kevytsoralle suunniteltu tasaus olisi tsv + 2.35 ja kevennyksen paksuus vaihtelee välillä 0,3- 1,0 m, joten kaivun ja kevennysmateriaalin määrät ovat tässä vaihtoehdossa hieman pienemmät kuin RR2-rakenteella. Kevytsoravaihtoehdossa päällysrakenne on 0,7 m paksu (pieni osuus 1,1 m paksu) ja muodostuu seuraavasti:

- AB 50 mm
- Kantava kerros 150 mm
- Jakava kerros 500 mm (osa 800 mm)

Taulukko 6.1. *Rengasrouheen hyödyntäminen kevennysmateriaalina. Koekohde Ilola-Sannäs (pt 11863). Rengasrouherakenteen kustannuslaskelma ja vertailu kevytsorakevennykseen.*

| RAKENTAMINEN/ Vaihe | RENGASROUHE (RR2) | | | | KEVYTSORA (KS 432) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Määrä/ Massa | Yksikkö | Yks.hinta (mk/yks) | Kustannus (mk) | Määrä/ Massa | Yksikkö | Yks.hinta (mk/yks) | Kustannus (mk) | |
| Kaivu | 5800 | m3-ktr | 10,- | 58 000,- | 4160 | m3-ktr | 10,- | | 41 600,- |
| Kaivumaiden kuljetus * | 3950 | " | 8,- | 31 600,- | 2320 | " | 8,- | | 18 560,- |
| (ylim. massat) | | | | | | | | | |
| Kevennysmateriaali ** | 3250,- | m3-rtr | 75,- | 243 750,- | 2640 | m3-rtr | 200,- | | 528 000,- |
| | | | | | | | | | |
| Kuitukangas (KL3/KL4) | 8350 | m2-tr | 5,- | 41 750,- | 8220 | m2-tr | 5,- | | 41 100,- |
| (rak.kerroksissa teräsverkko) | 2300 | " | 15,- | 34 500,- | - | | | | |
| **Päällyste:** | | | | | | | | | |
| AB20, (50mm) | 2460 | m2-tr | 22,- | 54 120,- | 2460 | m2-tr | 22,- | | 54 120,- |
| AB-tasausmassa | 25 | t | 200,- | 5000,- | 25 | t | 200,- | | 5 000,- |
| | | | | | | | | | |
| **Päällysrakenne:** | | | | | | | | | |
| Kantava kerros | 690 | m3-rtr | 50,- | 34 500,- | 450 | m3-rtr | 50,- | | 22 500,- |
| Jakava kerros | 1850 | " | 30,- | 55 500,- | 1850 | " | 30,- | | 55 500,- |
| (mater. tielinjalta) | | | | | | | | | |
| Jakava kerros | 920 | m3-rtr | 45,- | 41 400,- | 450 | m3-rtr | 45,- | | 20 250,- |
| (uusi materiaali) | | | | | | | | | |
| Rummun rakentaminen | 15 | m | 400,- | 6000,- | 15 | m | 400,- | | 6 000,- |
| **Kiertotie:** | | | | | | | | | |
| Rakennekerrokset | 1080 | m3-rtr | 40,- | 43 200,- | 1080 | m3-rtr | 40,- | | 43 200,- |
| Lujiteverkko | 2420 | m2-tr | 20,- | 48 400,- | 2420 | m2-tr | 20,- | | 48 400,- |
| | | | | 697 720,- | | | | | 884 230,- |
| KUSTANNUKSET | | | (yleiskust. 15 %) | 104 280,- | | | (yleiskust. 15 %) | | 132 770,- |
| YHTEENSÄ (mk) | | | YHTEENSÄ | 802 000,- | | | YHTEENSÄ | | 1 017 000, |

* = *voidaan todennäköisesti läjittää alle kilometrin päähän maisemointitäytöksi*

** = *rengasrouhe (RR2) -> materiaali tiivistettynä rakenteessa*

*m3-krt* = *kiintoteoreettinen - m$^3$*

*m3-rtr* = *rakenneteoreettinen - m$^3$*

*m2-tr* = *teoreettinen - m$^2$*

Taulukosta havaitaan, että kustannushyöty rengasrouherakenteella on noin 200 000 mk. Kevennysmateriaalina rengasrouhetta on noin 20 % enemmän kuin kevytsoraa ja RR2-materiaalin $m^3$-krt -hinta on noin 60 % halvempi kuin kevytsoran. Kevytsorarakenteella ei ole puolestaan niin paksua päällysrakennetta, mikä alentaa kustannuksia kantavan ja jakavan kerrosten massamäärien ollessa pienemmät. Päällysteen (AB) ja kiertotien sekä kuivatuksen (rumpu) rakentamisen kustannukset ovat molemmissa tapauksissa samat.

RR2:lle on käytetty käyttöluokan 4 (KL4) kuitukangasta ja kevytsoralle puolestaan käyttöluokan 3 (KL3) kangasta. Laskelmassa ei ole huomioitu koekohteen instrumentoinnin eikä suunnittelun kustannuksia, jotka hieman lisäävät kokonaishintaa erikoiskohteen ollessa kyseessä. Kokonaiskustannukseen on lisätty vielä yleiskustannuslisä, joka on noin 15 %.

## 7. YHTEENVETO

Tämä tehty esiselvitysraportti on osa Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n ja Tielaitoksen yhteistyöprojektia, jonka tavoitteena on tutkia jäterenkaiden soveltuvuutta tie- ja katurakentamiseen. Projektin tavoitteena on lisäksi edistää rengastuotteiden käyttöä maarakenteissa valtakunnallisesti. Tässä esiselvityksessä on kirjallisuuden perusteella esitetty kokonaisten renkaiden ja renkaista valmistettavan rengasrouheen teknisiä ominaisuuksia sekä mahdollista hyödyntämistä tie- ja katurakentamiseen ja lisäksi myös muihin käyttökohteisiin. Esiselvityksen hyödyntämiskohteissa kuvauksen pääpaino oli rengasrouheen hyödyntäminen tierakenteissa kevennysmateriaalina.

Valtioneuvoston päätöksen mukaisesti renkaat tulee kerätä hyötykäyttöä varten eikä niitä saa sijoittaa enää kaatopaikoille. Tämän vuoksi on Suomessa järjestetty valtakunnallinen jäterenkaiden keräysverkosto (Suomen Rengaskierrätys Oy:n ja Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n yhteistyösopimus). Esiselvityksessä on kuvattu Suomessa tapahtuvaa jäterenkaiden kierrätystoimintaa sekä kerrottu renkaista valmistettavista tuotteista. Kokonaisista autonrenkaista (RR0) voidaan valmistaa erityisellä rengasleikkurilla suurikokoista rengasrouhetta RR1 (10x30 $cm^2$) ja rengasrouhetta RR2 (5x5 $cm^2$), joiden hyödyntäminen erilaisissa maarakenteissa on mahdollista ja kannattavaa.

Rengasrouheen materiaaliominaisuuksia selvitettiin eri kirjallisuuslähteiden avulla. Materiaalia on tutkittu Yhdysvalloissa melko laajalti ja julkaisuja laboratoriotutkimusten tuloksista oli useita. Kevennysmateriaalina käytön kannalta tärkeimmät tekniset ominaisuudet ovat luokitusominaisuuksista rengasrouheen tiheys ja tilavuuspaino sekä lujuus- ( $\phi'$ ) ja muodonmuutosominaisuudet (E, $K_o$, $\nu$). Näiden em. ominaisuuksien lisäksi laboratoriossa ja koerakenteilla on tutkittu rengasrouheen hydraulisia ja lämpöteknisiä ominaisuuksia, joilla on vaikutusta sovellettaessa materiaalia kuivatusrakenteissa ja tie- ja katurakenteissa routaeristeenä.

Tutkimusten mukaan rengasrouheen tilavuuspaino riippuu raekoosta ja tiivistämisestä. Suurikokosen rengasrouheen (RR1) tilavuuspaino on pienempi (noin 3-4 $kN/m^3$) kuin RR2-rengasrouheen ja lisäksi RR1-materiaalia ei pystytä tiivistämään yhtä tehokkaasti. Laboratoriossa on rengasrouheelle saatu hieman pienempiä tilavuuspainon arvoja (3,4-6,9 $kN/m^3$ ) kuin maastossa koekohteista määritetyt arvot (6,7-8,3 $kN/m^3$) riippuen tiivistämisestä tai RR-kerroksen päälle rakennettavan päällysrakenteen paksuudesta. Arvioitaessa rakenteessa toteutuvaa tilavuuspainoa suunnittelua varten huomioidaan RR-kerroksen kokoonpuristuminen omasta painostaan sekä päällysrakenteen painosta.

Rengasrouheen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia on selvitetty laboratoriossa erityisesti materiaalille kehitetyillä suuruusluokaltaan isommilla ödometreillä ja kolmiaksiaalilaitteilla, joita ei ole Suomessa käytössä. Rengasrouheen lujuusominaisuudet eli tehokas kitkakulma ja koheesio on tutkimuksissa määritetty myös rasialeikkauskokeella. Laboratoriokokeilla määritettyjen materiaalin kitkakulman arvot (19-27° ) ovat olleet melko alhaisia, mihin saattaa vaikuttaa leikkauskokeiden suoritustapa ja materiaalin anisotrooppisuus.

Tien päällysrakenteen mitoittaminen on vaativa ja tärkeä tehtävä käytettäessä joustavaa ja kimmoista rengasrouhetta tiepenkereen kevennysmateriaalina. Tierakenteen kantavuus muodostuu mitoittavaksi tekijäksi rengasrouheen suuren jousto-ominaisuuden ja kokoonpuristumisen johdosta. Heti rakentamisen jälkeen tapahtuva rengasrouhekerroksen kokoonpuristuminen on karkeasti noin 10-15 % kerrospaksuudesta. Etukäteen suoritettavien kantavuuslaskelmien lisäksi tulisi rakennuskohteissa riittävä kantavuuden saavuttaminen tarkistaa rakentamisen aikana pudotuspainolaitteella ja tarvittaessa lisätä päällysrakenteen paksuutta. Päällysrakenteen toimivuutta RR-rakenteen yhteydessä olisi kuitenkin syytä tutkia lisää koerakenteilla ja laboratoriokokeilla.

Autonrenkaista valmistettavaa rengasrouhetta voidaan tie- ja katukenteissa hyödyntää kevennys- ja routasuojausmateriaalina sekä lisäksi penkereen täyttömateriaalina. Kevennysmateriaaliksi rengasrouhe soveltuu hyvin pienen tilavuuspainon johdosta. Rengasrouheen pienen lämmönjohtavuuden ansiosta materiaali soveltuu käytettäväksi myös tehokkaana tierakenteiden routasuojana. Näiden em. kohteiden lisäksi rengasrouheen hyödyntämisestä on positiivisia kokemuksia kaatopaikkojen kuivatusrakenteissa (suuri vedenläpäisevyys) sekä erilaisten tukimuurien ja -seinien taustatäytöissä (pieni lepopainekerroin). Autonrenkaita voidaan myös tehokkaasti hyödyntää erilaisissa luiskan suojaus- ja vahvistusrakenteissa ja eroosiosuojina sekä erilaisissa meluvallirakenteissa.

Yhdysvalloissa on toteutettu tutkimustarkoitukseen useita eri koekohteita, joissa on suoritettu instrumentointeja mm. painumien, siirtymien, roudan syvyyden ja ympäristövaikutusten arvioimiseksi. Koekohteita on rakennettu sekä kokonaisista renkaista että rengasrouheesta. Tässä esiselvitysraportissa on kuvattu kaksi rengasrouheesta rakennettua koerakennetta, joista toinen on maanvieremän pysäyttämiseksi tehty kevennysrakenne ja toinen on routasuojauskohde. Koerakenteista mitattujen havaintojen lisäksi on raportissa kerrottu rakentamisen työtekniikasta.

Oregonissa sijaitsevassa kevennyskoekohteessa rengasrouhe toimi erinomaisesti eikä maanvieremä kevennyksen ja vastapenkereen rakentamisen jälkeen enää liikkunut. Kevennyskohteessa 1 vuoden aikana tehtyjen mittausten perusteella painumat ja siirtymät pysyivät sallituissa rajoissa eikä rakenteessa ilmennyt mitään suurempia vaurioita. Mainessa sijaitsevan sorapintaisen routakoekohteen havaintojen perusteella rengasrouhe toimi erinomaisena routaeristeenä siten, että roudan tunkeutuminen pohjamaahan väheni lähes puoleen normaalista. Rengasrouheella routasuojattu tieosuus oli talven jälkeen huomattavasti paremmassa kunnossa verrattuna alkuperäiseen tierakenteeseen.

Koekohteiden rakentaminen on toteutettu normaalilla konekalustolla, jolla se on sujunut hyvin ilman suurempia ongelmatilanteita. Rakenteista mitattujen havaintosuureiden perusteella voidaan rengasrouhetta suositella käytettäväksi erilaisissa maarakenteissa. Koerakenteissa on toteutettu myös ympäristövaikutusten mittauksia, joilla on arvioitu materiaalin vaikutuksia esim. pohjaveden laatuun. Kohteisiin on rakennettu lysimetrejä (esim. kuva 5.1), joilla rengasrouheen läpi suotautunut vesi on kerätty talteen laboratoriossa suoritettavia tutkimuksia varten. Yhdysvalloissa on rengasrouheelle toteutettu myös hyvin laajoja liukoisuustestisarjoja laboratoriossa, joiden perusteella on havaittu eri metallien (Ba, Cd, Kr, Pb, Se, Zn) ja hiilivetyjen liukenemista materiaalista. Rengasrouheen ei ole kuitenkaan todettu olevan haitallinen jäte.

Suomessa rengasrouhe on ns. uusiomateriaali, jonka ympäristövaikutukset tulee tutkia laboratoriossa liukoisuustesteinä sekä koerakenteeseen asennettavilla havaintolaitteilla (kaivot ja lysimetrit). Suomen ympäristöviranomaisten (Ympäristökeskukset) vaatimien ympäristökelpoisuustestien suorittamisen jälkeen materiaali voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa hyväksyä yleiseksi maarakennusmateriaaliksi.

Rengasrouhe on sopiva materiaali käytettäväksi tiepenkereen kevennysrakenteissa ja lisäksi materiaalin hinta on edullinen verrattuna esimerkiksi kevytsoraan. Tämän raportin luvussa 6 on esitetty rengasrouheella toteutettavan kevennyskohteen rakennuskustannusten jakautuminen sekä vertailu kevytsoraan. Tämä kesällä -97 toteutettava noin 350 m pitkä kevennysosuus sijaitsee paikallistiellä 11863 välillä Ilola-Sannäs. Vertailulaskelman perusteella rengasrouherakenteen rakennuskustannukset ovat noin 200 000 mk pienemmät kuin, jos kohde rakennettaisiin kevytsoralla.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Ahmed,I. (1993), Laboratory Study on Properties of Rubber Soils. Final report. Department of Civil Eng., Purdue University, West Lafayette. Indiana Depart. of Transportation. 348s.

Ahmed, I. and Lovell, C.W (1993), Rubber soils as lightweight geomaterials. Transportation research record 1422. School of Civil Eng., Purdue University, West Lafayette, s.61-70.

Basheer, I.A. and Najjar, Y.M. (1996), Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles. Discussions and closure. Journal of performance of constructed facilities, February 1996. s. 40-41.

Berthelsen, G. (1989), Erosion control. California Dept. of Transportation, AASHTO Quarterly. s.6-7.

Bloomquist, D., Diamond, G., Oden, M., Ruth, B. and Tia, M. (1993), Engineering and environmental aspects of recycled materials for highway construction. Final Report. Western Research Institute Laramie, Wyoming. 220s.

Bosscher, P.J., Tuncer, B.E. and Eldin, N.N. (1992), Construction and performance of a shredded waste tire test embankment. Transportation research record 1345, s.44-52.

California Dept. of Transportation (1988), Use of discarded tires in highway maintenance. Translab design information brochure No. TL/REC/1/88.

Cartier, G., Long, N.T., Pouget, P., Bargillat, R. and Cudennec, J.P. Dechets Urbains et Pneumatiques Usages en Genie Civil (19 ). Lab. Central des Ponts et Chaussees, Paris, France. s.603-606.

Cecich, V., Gonzales, L., Hoisaeter, A., Williams, J. and Reddy, K. (1996), Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures. Waste Management & Reseach 14, s. 433-451.

Cosgrove, T.A. (1995), Interface Strength Between Tire Chips and Geomembrane for Use as Drainage Layer in a Landfill Cover. Proc. of Geosynthetics '95, Industrial Fabrics Association, St.Pauö, MN, vol.3,s.1157-1168.

Drescher, A. and Newcomb, D.E. (1994), Development of design guidelines for use of shredded tires as a leightweight fill in road subgrade and retaining walls. Center for Transportation Studies, Final Report 1990-1993, University of Minnesota, s. 137.

Duffy, D.P. (1996), The potential for use of shredded tire chips as a leachate drainage and collection medium: Design, construction and performance considerations. Proc. of the Conf. Shredded Tires in Landfill. Pub.Texas Natural Research Comission. s.115-132.

Eaton, R.A., Roberts, R.J. and Humphrey, D.N. (1994), Gravel road test sections insulated with scrap tire chips: construction and first year's results. Special Report 94-21, U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Eng. Lab., Hanover, 52s.

Edil, T.B. and Bosscher, P.J. (1992), Development of Engineering Criteria fo Shredded Waste Tires in Highway Applications. Final Report. University of Wisconsin. Pub. Department of Transportation, Wisconsin. 85s.

Edil, T.B. and Bosscher, P.J. (1994), Engineering properties of tire chips and soil mixtures. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.17, No.4, s.453-464.

Eldin, N.N. and Senouci, A.B. (1992), Use of scrap tires in road construction. Journal of Construction Engineering and Management, Vol.118, No.3, s.561-575.

Epps, J.A. (1994), Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Synthesis 198. Natinal Acad. press, Washington D.C. 162 s.

Goehrig, J. (1996), Using Shredded Tires in Landfills "the New York perpective". Proc. of the Conf. Shredded Tires in Landfill. Pub.Texas Natural Research Comission. s.95-106.

Hoppe, E.J. (1994), Field study of a shredded-tire embankment. Interim report. Virginia Trans. Research Council. 46s.

Humphrey, D.N. (1995), Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. Shredded Tires in Landfill Conference. Pub.Texas Natural Research Comission. s.35-69.

Humphrey, D.N. (1995,1996), Civil Engineering Applications of Chipped Tires. Department of Civil and Env. Eng., University of Maine. Maine Department of Transportation. 89s.

Humphrey, D., Chen, L.H. and Eaton, R.A. (1997), Laboratory and Field Measurement of the Thermal Conductivity of Tire Chips for Use as Subgrade Insulation. Preprint. Transportation Research Board 76th Annual Meeting, Jan 1997, Washington D.C. 1-27s.

Humphrey, D.N., Cosgrove, T., Whetten, N.L. and Hebert, R. (1997), Tire Chips Reduce Lateral Earth Pressure Against the Walls of a Rigid Frame Bridge. Proc. in Technical Seminar Renewal, Rehabilitation and Upgrades in Civil and Env. Eng. Maine, ASCE, s.1-11.

Humphrey, D.N. and Eaton, R.A. (1993), Tire chips as insulation beneath gravel surfaced roads. Frost in Geotech. Eng., Phukan, pub. Balkema, Rotterdam. s.137-149.

Humphrey, D.N., and Manion, W.P. (1992), Properties of Tire Chips for Lightweight Fill. Proc in Conf. Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol. 2. ASCE , s.1344-1355.

Humphrey, D.N. and Nickels, W.L. Jr. (1997), Effect of tire chips as lightweight fill on pavement performance. Proc. of the XIV int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng. Rotterdam, A.A. Balkema.

Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., Gharegrat, G. and Manion, W.P. (1992), Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls-Phase I. Department of Civil Engineering, University of Maine, Orono, 137 s.

Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M. and Manion, W.P. (1993), Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill. Transportation Research Record 1422. Dept. of Civil Eng., University of Maine, s.29-35.

Humphrey, D.N. and Sandford, T.C. (1993), Tire Chips as Lightweight Subgrade Fill and Retaining Wall Backfill. Proc. Of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and BY-Products for Construction of Highway Facilities, Federal Highway Administration, Washington, D.C., s.5-87 to 5-99.

Janek, S. and White, D. (1996), Leachate Collection Systems, protective Covers and other possible uses: design, permitting, QA/QC, operation test projects. Proc. of the Conf. Shredded Tires in Landfill. Pub.Texas Natural Research Comission. s.19-30.

Kubo, H. (1997), Experiment applying tire chips as frost insulation in concrete-channels. Proc. of the Intern. Symp. 'Ground Freezing 97', Luleå, Sweden. Rotterdam, A.A. Balkema. s.427-432.

Lareal, P., Long, N-T., Ursat, P. and Vezole, P. (1981), Le pneusol: Dix ans d'experiences d'ouvarages de genie civil. Proc. of the XI Eoropean Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. ECSMFE, Vol.2. Copenhagen, Danish Geotech. Society, s. 79-84.

Lesko, I., Hazivar, W. and Krejci, E. (1995??), Geostar- A new system of stabilizing slopes using old tyres. Proc. of the XI Eoropean Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. ECSMFE, Vol.2. Copenhagen, Danish Geotech. Society, s.85-92.

Manion, W.P. and Humphrey, D.N. (1992), Use of Tire Chips as lightweight and Conventional Embankment Fill. Phase I-Laboratory. Technical paper 91-1. University of Maine and Maine Department of Transportation. 192s.

Mroueh, U-M. ja Mäkelä, E. (1995), Sivutuotteiden hyötykäytön hyväksymismenettely maanrakentamisessa. Osa ympäristögeotekniikkaohjelma-projektia, TEKES, Espoo, Julk. VTT-Kemiantekniikka. 17s.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Mroueh, U-M., Keppo, M. & Rämö, P. 1995, Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maanrakentamisessa. Espoo, VTT-Kemiantekniikka, julk.809, 78s.

Newcomb, D.E. and Drescher, A. (1994), Engineering properties of shredded tires in lightweight fill applications. Transportation Reasearch Record 1437, Dept. of Civil and Mineral Eng., University of Minnesota, s. 1-7.

Nguyen, M.X and Williams, J.A. (1989), Implementation Package for Using Discarded Tires in Highway Maintenance. Report No. CA/TL-89/10. Office of Transportation Laboratory, California Department of Transportation, Sacramento, CA.

Shao,J., Zarling,J.P. and Esch,D. (1995). Thermal Conductivity of Recycled Tire Rubber for Insulation Beneath Roadways. Final Report, No. INE/TRC 94.12. Institute of Northern Eng., University of Alaska, Fairbanks. Pub.Transportation Research Center. 69s.

Sjöblom, S. (1994), Gummipulver och gummigranulat i vägläggningar. Slutrapport. Byggentreprenörernas vägforskningsgrupp. 16s.

Tammirinne, M., Juvankoski, M., Kivikoski, H., Leivo, M., Mroueh, U-M., Mäkelä, E., Peltonen, P., Pihlajamäki, J. ja Wahlström, M. (1995), Uusiotuotteiden maanrakennuskäytön edellyttämät tutkimukset laboratoriossa ja koerakenteilla, tiivistelmä. Osa ympäristögeotekniikkaohjelma-projektia, TEKES, Espoo, Julk. VTT-Yhdyskuntatekniikka. 13s.

Twin City Testing Corp. (1990), Waste tires in sub-grade road beds: a report on the environmental study of the use of shredded tires for roadway sub-grade support. Pub. Minnesota Pollution Control Agency, St.Paul, Minnesota. 34s.

Upton, R.J. and Machan, G. (1993), Use of shredded tires for lightweight fill. Transportation Research Record 1422, Oregon Dept. of Transportation. s.36-45.

Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (1996), alustava luonnos.

Vehkalahti, M., Pfister, K. & Laaksonen, H. (1989), Romuautot ja -renkaat. Ympäristöministeriö, työryhmän osamietintö., sarja C/42/1989. 66s.

Viatek-Kuopio (1997), Valtatie 5, Vuorelan melueste. Rakennepoikkileikkaus. Ennakkokopio. Suun. tilaaja: Tielaitos, Savo-Karjalan tiepiiri.

Zelipor, J.L. (1991), Leachate from Scrap Tires: RMA TCLP Report. Proc. in Education Seminar on Scrap Tire Management. Scrap Tire Management Council, Washnington, D.C., s. 381-391.

12.5.1997

# KUMIROUHEEN LABORATORIOTUTKIMUS

Tielaitoksen geopalveluiden laboratoriossa tutkittiin Säkkiväline Puhtaanapito Oy:n toimittamasta kumirouhenäytteestä irtotiheys, kiintotiheys, rakeisuus ja kappaleiden muoto. Lisäksi otettiin valokuvat irtotiheyden määrittämisestä ja muotoarvomäärityksessä käytetyistä kumirouhekappaleista.

Laboratoriokokeisiin tarvittavat osanäytteet (=testinäytteet) saatiin jakamalla kumirouhenäyte tarvittaviin osanäytteisiin. Tutkimukset tehtiin ilmakuivasta näytteestä.

## Kumirouheen irtotiheyden määritys

Kumirouheen irtotiheys eri kuormituksilla määritettiin ruostumattomassa terässylinterissä, jonka halkaisija oli 300 mm ja korkeus 350 mm. Sylinteriin laitettiin ilmakuivaa kumirouhetta 9595 g. Kumirouheen päälle asetettiin sylinterin halkaisijan kokoinen jäykkä levy, jota kuormitettiin ylhäältä sylinterin suunnassa hydraulisella puristimella. Koejärjestelyistä on esitetty kuva 1 liitteessä 1.

Kumirouheen kokoonpuristumaa mitattiin sylinterin yläreunasta digitaalisella työntömitalla neljästä kohdasta. Korkeusmitta laskettiin näiden neljän mittauksen keskiarvona.

Kuormitusta mitattiin voima-anturilla, joka oli sijoitettu kuormituslevyn ja hydraulisen puristimen väliin. Kokeessa kuormitusta lisättiin neljässä vaiheessa niin, että kuormituksen annettiin tasaantua ennen seuraavaa kuormitusvaihetta. Maksimikuormituksen jälkeen kuormitusta vähennettiin esikuormitukseen saakka ( 0,7 $kN/m^2$). Esikuorma muodostui voima-anturin ja kuormituslevyn massasta. Toisella kuormituskerralla kuormituksen palautus tehtiin neljässä vaiheessa.

Kuormitus toistettiin kaksi kertaa samalla näytteellä. Ennen toista kuormitusta kumirouhe poistettiin sylinteristä ja laitettiin uudelleen rouhekappaleiden uudelleenjärjestäytymisen mahdollistamiseksi.

## Kumirouheen kiintotiheyden määritys

Kiintotiheys on massan ja tilavuuden suhde, kun huokoset jätetään ottamatta huomioon. Kiintotiheys määritettiin menetelmällä PANK- 2107.

Kumirouheen kiintotiheys määritettiin punnitsemalla näyte vedessä ja ilmassa. Näytteen annettiin olla vesiupotuksessa neljä tuntia, jotta huokosissa oleva ilma saatiin mahdollisimman hyvin poistettua. Näytteen massan muutosta seurattiin vesiupotuksen ajan punnitsemalla.

| | POSTIOSOITE | KÄYNTIOSOITE | LABORATORIO-NÄYTTEIDEN TOIMITUS | PUHELIN | TELEFAX |
|---|---|---|---|---|---|
| Geopalvelut | PL 33<br>00521 HELSINKI | Opastinsilta 12 A<br>00520 HELSINKI | Kirjurinkatu 2-4<br>00520 HELSINKI | 0204 44 150 | 0204 44 2154<br>0204 44 2019 laboratorio |
| Oulun kehitysyksikkö | PL 261<br>90101 OULU | Kansankatu 53<br>90100 OULU | | 0204 44 158 | 0204 44 6916 |

**LIITE 1b**

**Kumirouheen rakeisuuden määritys**

Materiaalin rakeisuus kuvaa eri kokoisten rakeiden suhteellista osuutta aineksesta. Rakeisuus määritettiin menetelmällä PANK- 2101.

Näytteen rakeisuus määritettiin kuivasta kumirouheesta. Rakeisuusmäärityksessä näytteen kokonaismassa oli 5457 grammaa, joka seulottiin neljänä erillisenä seulontana. Seulonnassa käytettiin halkaisijaltaan 300 mm suuruisia, aukkokooltaan 8, 16, 32, 50, 63 mm seuloja. Seulat läpäissyt aines sisälsi teräslankoja ja kumipölyä.

**Kumirouheen muotoarvo**

Kappaleiden muotoarvo määritettiin menetelmällä TIE 233.

Kappaleiden muoto ilmoitetaan ns. muotoarvolla, joka määritetään kappaleiden dimensioiden akselisuhteilla puikkoisuus (c/a) ja liuskeisuus (b/a), missä

a on kappaleen paksuus ( lyhin akseli )
b on kappaleen leveys ( keskimmäinen akseli )
c on kappaleen pituus ( pisin akseli )

Muotoarvon määrittämisessä käytettiin GeoStar-20 mittausohjelmaa, joka laskee muotoarvojen parametrit digitaalisen työntömitan avulla mitatuista dimensioista. Parametrit määritettiin 100-kumirouhekappaleen otoksesta.

**Kokeissa käytettyjen mittausvälineiden lukematarkkuudet**

- Digitaalinen työntömitta 0,01 mm
- Kuormitusanturi 0,01 kN
- Vaaka 0,1 g

## TUTKIMUSTULOKSET

**Irtotiheys**

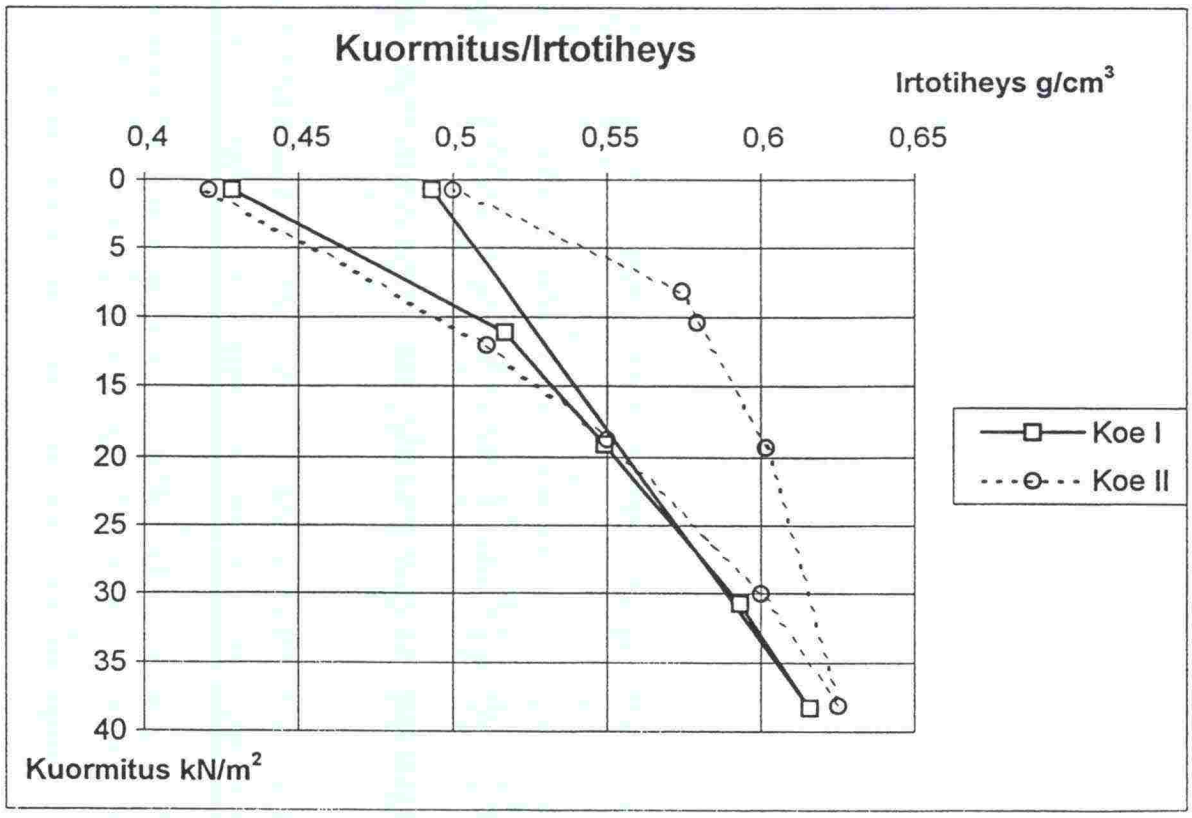
Kumirouheen kuormitus-kokoonpuristumiskäyttäytyminen oli molemmilla kuormituskerroilla hyvin samanlainen. Irtotiheys muuttui kuormituksessa noin 0,4:stä noin 0,6 g/cm$^3$:iin ( 1g/cm$^3$ = 1000 kg/m$^3$ ). Kuormituksen palauduttua esikuormitukseen (0,7 kN/ m$^2$) näytteen irtotiheyden muutos oli ensimmäisessä kuormituksessa n. 15 % ja toisessa kuormituksessa n. 19 %. Irtotiheyden kehitys on esitetty taulukossa 1 ja kuvassa 2.

**LIITE 1c**

Näytteen massa 9595 g
Näytesylinterin pinta-ala 708 $cm^2$
Näytteen kiintotiheys 1,20 $g/cm^3$
Esikuormitus 0,7 $kN/m^2$

**Taulukko 1. Kuormituksen ja irtotiheyden arvot näytteen kokoonpuristumisessa.**

| Kuormitus I | | Kuormitus II | |
|---|---|---|---|
| Kuormitus $kN/m^2$ | Irtotiheys $g/cm^3$ | Kuormitus $kN/m^2$ | Irtotiheys $g/cm^3$ |
| 0,7 | 0,428 | 0,7 | 0,421 |
| 11,0 | 0,517 | 11,9 | 0,511 |
| 19,1 | 0,549 | 18,8 | 0,550 |
| 30,7 | 0,593 | 30,1 | 0,600 |
| 38,3 | 0,616 | 38,1 | 0,625 |
| Kuormituksen palautus | | Kuormituksen palautus | |
| 0,7 | 0,493 | 19,4 | 0,602 |
| | | 10,3 | 0,579 |
| | | 8,2 | 0,574 |
| | | 0,7 | 0,500 |




**Kuva 2. Irtotiheyden muutos eri kuormituksilla**

| | POSTIOSOITE | KÄYNTIOSOITE | LABORATORIO-NÄYTTEIDEN TOIMITUS | PUHELIN | TELEFAX |
|---|---|---|---|---|---|
| Geopalvelut | PL 33<br>00521 HELSINKI | Opastinsilta 12 A<br>00520 HELSINKI | Kirjurinkatu 2-4<br>00520 HELSINKI | 0204 44 150 | 0204 44 2154<br>0204 44 2019 laboratorio |
| Oulun kehitysyksikkö | PL 261<br>90101 OULU | Kansankatu 53<br>90100 OULU | | 0204 44 158 | 0204 44 6916 |

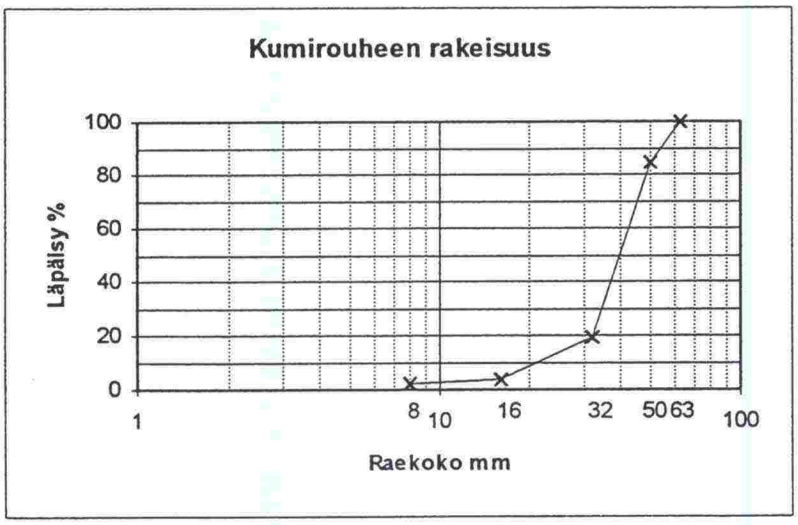
**LIITE 1d**

## Rakeisuusmääritys

Rakeisuuden määrityksen perusteella kumirouhekappaleiden keskimääräinen raekoko $d_{50}$ on 40,0 mm. Seulontatulokset on esitetty taulukossa 2 ja kuvassa 3.

**Taulukko 2. Seulotun kumirouhenäytteen läpäisyarvot**

| Seulakoko mm | Läpäisy % |
|---|---|
| 63 | 100 |
| 50 | 84,4 |
| 32 | 19,3 |
| 16 | 3,6 |
| 8 | 2,2 |




**Kuva 3. Kumirouhenäytteen raekokojakauma**

## Muotoarvo

Kumirouhekappaleiden keskimääräisiksi mitoiksi saatiin:

paksuus (a) = 16,5 mm
leveys (b) = 40,0 mm
pituus (c) = 68,2 mm

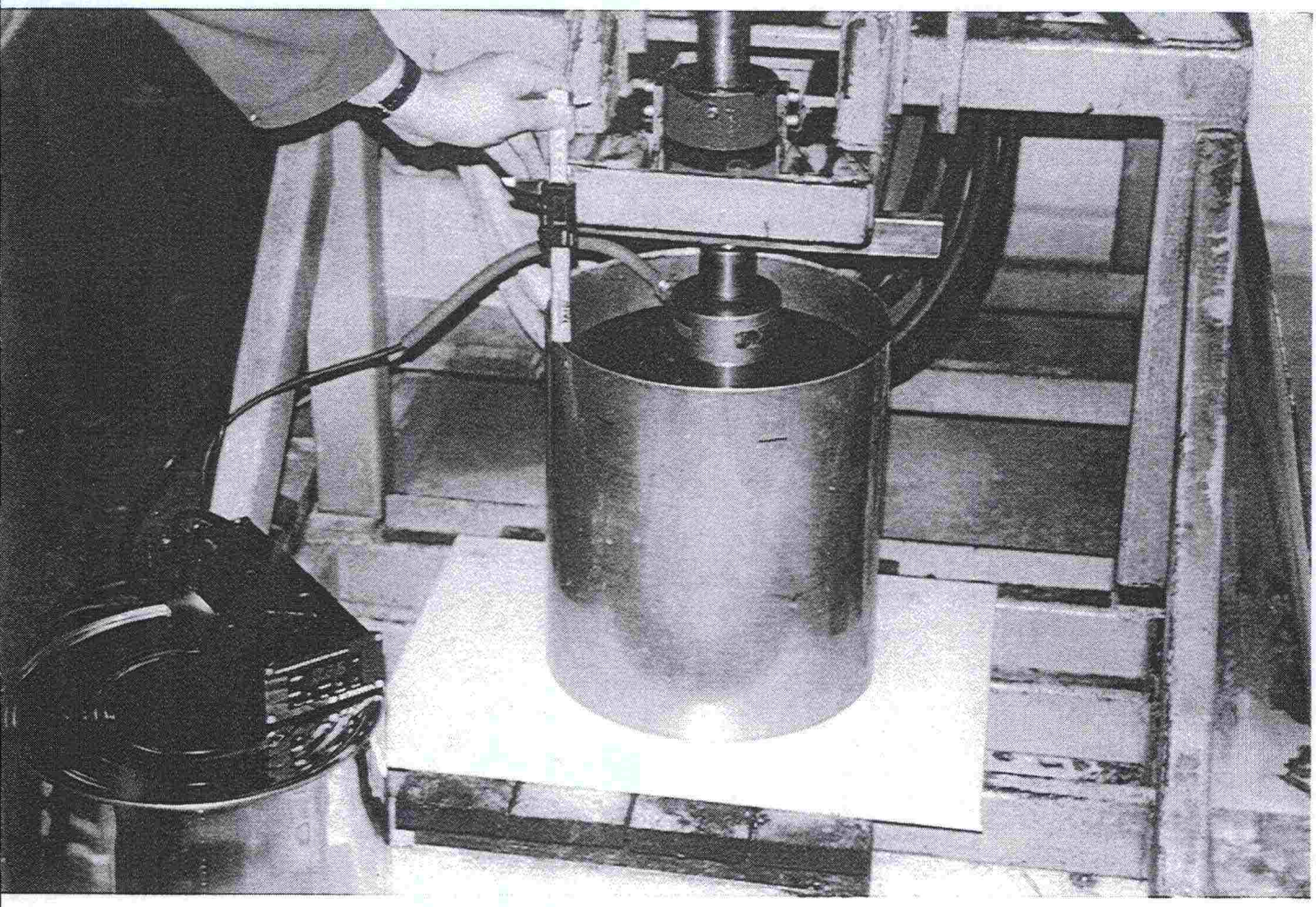
Näytteen puikkoisuusarvo (c/a) on 4,13
Näytteen liuskeisuusarvo (b/a) on 2,42

Muotoarvon perusteella kumirouhe on muodoltaan liuskeista. Muotoarvo on määritetty liitteen 2 kuvassa 4 olevista kumirouhekappaleista.

Geologi Kari Lappalainen Laborantti Jukka Naukkarinen

| | POSTIOSOITE | KÄYNTIOSOITE | LABORATORIO-NÄYTTEIDEN TOIMITUS | PUHELIN | TELEFAX |
|---|---|---|---|---|---|
| Geopalvelut | PL 33<br>00521 HELSINKI | Opastinsilta 12 A<br>00520 HELSINKI | Kirjurinkatu 2-4<br>00520 HELSINKI | 0204 44 150 | 0204 44 2154<br>0204 44 2019 laboratorio |
| Oulun kehitysyksikkö | PL 261<br>90101 OULU | Kansankatu 53<br>90100 OULU | | 0204 44 158 | 0204 44 6916 |

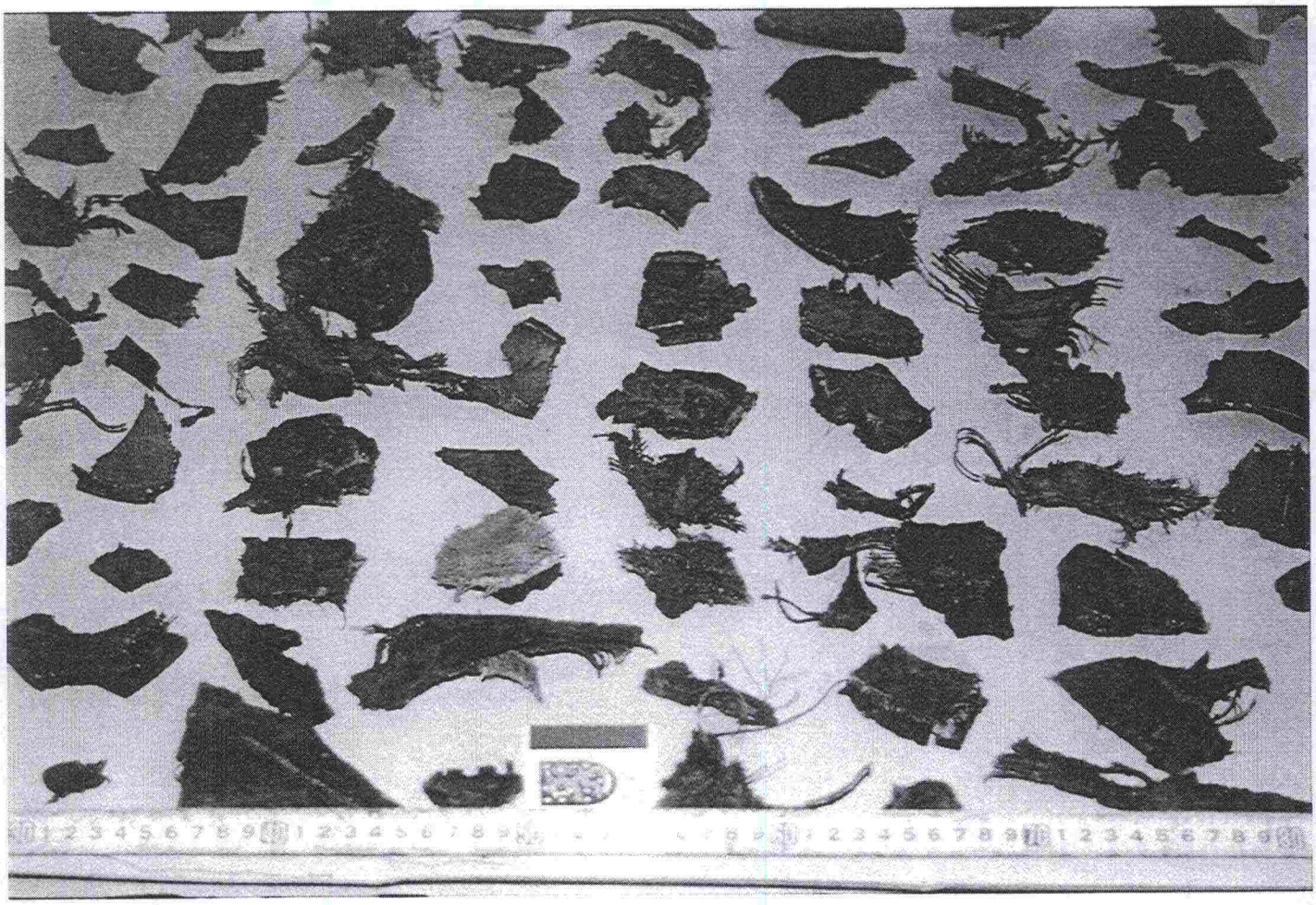
**LIITE 1e**



**Kuva 1. Kumirouheen irtotiheyden määrittäminen hydraulisen puristimen avulla.**


| | POSTIOSOITE | KÄYNTIOSOITE | LABORATORIO-NÄYTTEIDEN TOIMITUS | PUHELIN | TELEFAX |
|---|---|---|---|---|---|
| Geopalvelut | PL 33<br>00521 HELSINKI | Opastinsilta 12 A<br>00520 HELSINKI | Kirjurinkatu 2-4<br>00520 HELSINKI | 0204 44 150 | 0204 44 2154<br>0204 44 2019 laboratorio |
| Oulun kehitysyksikkö | PL 261<br>90101 OULU | Kansankatu 53<br>90100 OULU | | 0204 44 158 | 0204 44 6916 |

**LIITE 1f**



**Kuva 4. Muotoarvomäärityksessä käytetyt kumirouhekappaleet.**


| | POSTIOSOITE | KÄYNTIOSOITE | LABORATORIO-NÄYTTEIDEN TOIMITUS | PUHELIN | TELEFAX |
|---|---|---|---|---|---|
| Geopalvelut | PL 33<br>00521 HELSINKI | Opastinsilta 12 A<br>00520 HELSINKI | Kirjurinkatu 2-4<br>00520 HELSINKI | 0204 44 150 | 0204 44 2154<br>0204 44 2019 laboratorio |
| Oulun kehitysyksikkö | PL 261<br>90101 OULU | Kansankatu 53<br>90100 OULU | | 0204 44 158 | 0204 44 6916 |

YHDYSKUNTATEKNIIKKA
Väylät ja ympäristö
R. Laaksonen, H. Onninen

29.5.1997

**LIITE 2a**

# RENGASKUMIROUHEEN MEKAANISTEN OMINAISUUKISEN MÄÄRITYS

## Kitkakulman ja koheesion määritys

*Laite*
Rasian pinta-ala on 305 x 305 $mm^2$ ja kokonaiskorkeus 174 mm. Rasian maksimaalinen leikkausliike vaakasuunnassa on n. 43 mm.

*Näyte*
Rasialeikkauskokeissa käytettiin tilaajan toimittamaa rengasrouhetta (RR2), joista poistettiin suurimmat kappaleet (näytteen kumirakeiden suurin läpimitta oli 80...100 mm). Kokeita varten rengasrouhe aseteltiin ja tiivistettiin rasiaan käsin painelemalla ja nuijalla koputtelemalla. Ennen lopullisen pystykuormituksen asettamista näyte esikuormitettiin lyhytaikaisesti 50 kPa pystykuormituksella (samoin tehtiin myös jäljempänä kuvattavassa jäykkyysmoduulimäärityksessä). Lyhytaikaisen kuormituksen tarkoituksena oli saattaa rengasrouhe likimäärin sellaiseen tiiviystilaan, joka vastaa esimerkiksi täryjyrällä tierakenteeseen tiivistetävän ja sen jälkeen päällysrakenteen painolla kuormitettavan rengasrouheen tiiviyttä. Leikkauskokeissa näytteiden kuivatiheydet vaihtelivat välillä 572 ...658 $kg/m^3$.

*Kokeet*
Kokeet tehtiin sekä kuivilla että kyllästetyillä näytteillä. Koesarjassa käytetyt pystykuormitukset olivat 10, 20 ja 30 kPa. Leikkausnopeus oli 0.5 mm/min. Kokeen aikana mitattiin leikkausvoima, vaaka- ja pystysiirtymä. Näyte kyllästettiin täyttämällä koko rasian suoja-allas vedellä näytteen yläpintaa myöten.

*Tulokset*
Mitatuista tuloksista laskettiin kuivan ja märän rengasrouheen kitkakulman ja koheesion arvo eri vaakasiirtymän arvoilla. Lasketut kitkakulman ja koheesion arvot esitetty taulukossa 1. Laskelmissa on tehty pinta-alakorjaus.

***Taulukko 1. Kitkakulman ja koheesion arvot eri vaakasiirtymän arvoilla kuivilla ja märillä näyttei llä.***

| Vaakasiirtymä (mm) | Kuiva/märkä | Kuivatiheys (kg/m3) | Kitkakulma (°) | Koheesio (kPa) |
|---|---|---|---|---|
| 20 | kuiva | 572 | 21.6 | 8.5 |
| 30 | kuiva | 607 | 30.8 | 9.1 |
| 40 | kuiva | 628 | 40.4 | 8.1 |
| | | | | |
| 20 | märkä | 625 | 17.0 | 8.7 |
| 30 | märkä | 631 | 26.1 | 9.0 |
| 40 | märkä | 658 | 28.5 | 10.2 |

*Tulosten tarkastelu*
Leikkausjännityksen yksiselitteistä maksimia ei saavutettu leikkauksen aikana. Tämä johtuu rengasrouheen suuresta raekoosta ja kokoonpuristumisesta sekä laitteiston vaakasiirtymän rajallisuudesta.

Kokeissa määritetyt kitkakulman ja koheesion arvot vastaavat hyvin aiemmin kirjallisuudessa esitettyjä arvoja. Humphrey ym. (1993) ovat saaneet vastaavanlaisen rengasrouheen kitkakulmaksi 19...26° ja koheesioksi 4.3...11.5 kPa. Leikkauskokeissa rengasrouheen kuivatiheys (572...658 kg/m$^3$) vastasi likimäärin aikaisemmin Uudenmaan tiepiirissä määritettyä tiheyttä 616...625 kg/m$^3$, joka on määritetty 38.1...38.1 kPa:n kuormituksen alaisena.

## Jäykkyysmoduulin ja Poisson -luvun määritys

*Laite*

Rengasrouheen jäykkyysmoduuli määritettiin dynaamisella kolmiakselikokeella. Kokeissa käytettiin vakuumitekniikkaan perustuvaa menettelyä näytteen sellipaineen säätämisessä. Näytteen muotin koko on (halkaisija x korkeus) 250 x 500 mm.

*Näyte*

Näyte valmistettiin muottiin käsin täyttämällä ja tiivistämällä. Ennen kuormituslevyn asentamista näyte esikuormitettiin muotissa 50 kPa lyhytaikaisella kuormalla (samoin kuin edellä kuvatussa rasialeikkasukokeessa). Näyte valmistettiin kuivasta rouheesta. Näytteen tiheys muotissa oli n. 581 kg/m$^3$. Valmis näyte siirrettiin kuormituskehään ja näytteeseen imettiin 20 kPa alipaine, jonka jälkeen muotti poistettiin. Alipaineen asettamisen jälkeen näytteen halkaisija, korkeus ja tiheys olivat: 242 mm, 450 mm ja 688 kg/m$^3$. Ennen kokeen aloitusta näytteeseen kiinnitettiin halkaisijaa mittaavat anturit.

*Koe*

Jäykkyysmoduuli ja Poisson -luku määritettiin kahdella jännitystasolla ja kuormitustaajuudella. Sellipaine (imupaine) oli 20 kPa. Kuormitus tehtiin sini -muotoisella 0.5/1 Hz taajuisella pulssilla voimaohjattuna. Kokeissa mitattiin pystyvoima, -siirtymä ja vaakasiirtymät. Kummallakin kuormatasolla tulokset määritettiin 400 - 500 syklin kohdalta. Koetuloksista lasketut jäykkyysmoduulin ja Poisson -luvun arvot on esitetty taulukossa 2.

***Taulukko 2. Tutkitun rengasrouheen jäykkyysmoduulin ja Poisson -luvun arvot.***

| Aksiaalinen kuormitusamplitudi (kPa) | Taajuus (Hz) | Jäykkyysmoduuli (MPa) | Poisson -luku (-) |
|---|---|---|---|
| 4.0 | 1 | 1.1 | 0.09 |
| 6.4 | 0.5 | 1.0 | 0.1 |

*Tulosten tarkastelu*

Koetulokset vastaavat hyvin kirjallisuudesta löytyviä vastaavia arvoja. Likimäärin vastaavalla sellipaineella (n. 38 kPa) saivat Bosscher ym. (1997) jäykkyysmoduulille arvon n. 1 MPa, joka on saman suuruinen, kuin tämän tutkimuksen yhteydessä määritetty jäykkyysmoduuli (1.0...1.1 MPa).

Edil ja Bosscher (1994) ovat saaneet aksiaalisesta puristuskokeesta määritetyn maanpainekertoimen ($K_0$) avulla Poisson -luvulle arvon 0.2 - 0.3. Määritystapa ei vastaa tämän tutkimuksen määritystä, jossa Poisson-luku määritettiin dynaamisen kolmiakselikokeen aikana mitattujen vaaka- ja pystymuodonmuutosten suhteena. Tulokseksi saatu Poisson -luku (0.09...1.0) on edellämainittua arvoa pienempi.

Jäykkyysmoduulin ja Poisson -luvun arvot muuttuvat hieman rouheen tiheyden vaihdellessa. Käytetty kuormitustaajuus ei vaikuta rouheen jäykkyyteen, koska rengasrouhe ei ole viskoelastinen materiaali.

Dynaamisessa kolmiakselikokeessa käytetyn rengasrouheen kuivatiheys (muotissa ennen koetta 581 kg/m3 ja 20 kPa:n alipaineen asettamisen jälkeen 688 kg/m$^3$) oli likimäärin sama, kuin rasialeikkauskokeissa ollut kuivatiheys (572...658 kg/m$^3$).

*Kirjallisuus*

Bosscher, P.J., Edil, T.B. and Kuraoka, S. 1997. Design of highway embankments using tire chips. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 123, No. 4. p. 295...304.

Edil, T.E. and Bosscher, P.J. 1994. Engineering properties of tire chips and soil mixtures. Geotchnical Testing Journal, Vol 17, No 4. p 453...464

Humphrey, D.N, Sandford, T.C., Cribbs, M.M. and Manion, W.P. 1993. Shear strength and Compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill. Trasporation Research Record 1422. p. 29...35.